Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК: 539.23, 539.216.1, 621.787: 621.789 ГРНТИ: 29.12.22, 55.03.05, 55.20.27, 55.22.29 Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:

Исполнитель: Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

От имени Руководителя организации

/ В.А. Ковалев/ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 5 этапа Государственного контракта № 16.740.11.0641 от 02 июня 2011 г.

Исполнитель: Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.1 Проведение научных исследований молодыми учеными кандидатами наук.

Проект: Наноинженерия поверхностного слоя при внешних энергетических воздействиях на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин

Руководитель проекта:

/Махалов Максим Сергеевич

(подпись)

Кемерово 2013 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту 16.740.11.0641 от 02 июня 2011 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Руководитель темы:

кандидат		Махалов М. С.
технических наук, без ученого звания	подпись, дата	
Исполнители темы:		
доктор технических		Блюменштейн В. Ю.
наук, профессор	подпись, дата	
кандидат		Кречетов А. А.
технических наук, доцент	подпись, дата	
без ученой степени,		Пимонов М. В.
без ученого звания	подпись, дата	
канлилат		Абабков Н. В.
технических наук, без ученого звания	подпись, дата	

Реферат

Отчет 237 с., 3 ч., 160 рис., 30 табл., 39 источн., 0 прил.

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРОГРАММА НАГРУЖЕНИЯ, УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА, ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ, ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ, ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ, ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 5 этапу Государственного контракта № 16.740.11.0641 "Наноинженерия поверхностного слоя при внешних энергетических воздействиях на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин" (шифр "2011-1.3.1-207-008") от 02 июня 2011 по направлению "Проведение научных исследований молодыми кандидатами наук в следующих областях:- нанотехнологии и наноматериалы; - механотроника и создание микросистемной техники; создание биосовместимых материалов; - создание и обработка композиционных и керамических материалов; - создание и обработка кристаллических материалов; - создание и обработка полимеров и эластомеров; - создание мембран и каталитических систем; металлургические технологии; - строительные технологии" в рамках мероприятия 1.3.1 "Проведение научных исследований молодыми учеными кандидатами наук.", мероприятия 1.3 "Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук и целевыми аспирантами в научно-образовательных центрах", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Разработка теории и раскрытие наследственных физических закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния и остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин и разработка средств автоматизации проектирования комбинированных упрочняющих технологических процессов

Исследования и аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя, моделей программ нагружения имеющих значительное количество участков квазимонотонной деформации и закономерностей формирования и трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки и эксплуатации проводилось с использованием: - метода конечных элементов;

- метода регрессионного анализ данных;

- методов упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием и размерным совмещенным обкатыванием;

- методик испытаний исследования механических свойств на растяжение, сжатие и изгиб;

- методики испытаний на усталостную долговечность по схеме изгиба с вращением.

Исследования и аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя, моделей программ нагружения имеющих значительное количество участков квазимонотонной деформации и закономерностей формирования и трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки и эксплуатации проводилось с использованием: - аппарата механики технологического наследования, разработанной и апробированной коллективом заявителей.

- системы универсальной электромеханической Instron 3369, для исследования механических свойств образцов на растяжение, сжатие и изгиб;
- установки для проведения испытаний на усталостную долговечность по схеме изгиба с вращением;

- установок для проведения упрочняющей обработки, разработанной коллективом исследователей КузГТУ.

Моделирование процессов осуществлялось методом конечных элементов с использованием программного комплекса «Ansys».

Регрессионный анализ данных, получение статистических моделей и их оценка осуществлялись с использованием программного комплекса «Statistica».

Материалы теоретических и экспериментальных исследований, раскрывающие содержание работ по решению поставленных научноисследовательских задач, включая:

 Аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки и эксплуатации.
 Разработку аналитических моделей программ нагружения имеющих

значительное количество участков квазимонотонной деформации.

3. Аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки и эксплуатации.

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	Титульный лист	1
	Список исполнителей	2
	Реферат	3
	Содержание	5
	Введение	7
	Аналитическое описание закономерностей формирования и	
1	трансформации наноструктурного состояния поверхностного	10
1.	слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки и эксплуатации	10
	Механика формирования структурного и механического	
	состояния поверхностного слоя на сталиях упрочняющей	
1.1.	обработки поверхностным пластическим леформированием и	10
	размерным совмешенным обкатыванием	
1.1.1.	Постановка залач	10
	Оценка формирования структурного и механического	10
	состояния поверхностного слоя на сталии упрочняющей	
1.1.2.	обработки поверхностным пластическим леформированием	16
	после первого рабочего хола	
	Оценка формирования структурного и механического	
	состояния поверхностного слоя на стадии упрочняющей	
1.1.3.	обработки поверхностным пластическим деформированием	29
	после второго рабочего хода с учетом наследуемых свойств	
	поверхностного слоя	
	Оценка формирования структурного и механического	
	состояния поверхностного слоя на стадии упрочняющей	
1.1.4.	обработки поверхностным пластическим деформированием	42
	после третьего рабочего хода с учетом наследуемых свойств	
	поверхностного слоя	
	Оценка формирования структурного и механического	
1.1.5.	состояния поверхностного слоя на стадии упрочняющей	50
	обработки размерным совмещенным обкатываниием	
	Механика трансформации структурного и механического	
1.2.	состояния поверхностного слоя на стадии циклического	66
	эксплуатационного нагружения	
1.2.1.	История нагружения до зарождения усталостной трещины	66
1 2 2	Оценка напряженного состояния поверхностного слоя с	78
1.2.2.	учетом истории нагружения	70
123	Релаксация остаточных напряжений и динамика показателя	03
1.4.9.	схемы напряженного состояния с учетом истории нагружения	75
	Разработка аналитических моделей программ нагружения	
2.	имеющих значительное количество участков	103
	квазимонотонной деформации	

2.1.	Трансформация программ нагружения по стадиям жизненного цикла с учетом истории нагружения	103
	Аналитическая молель программы нагружения и	
	наслелственные закономерности исчерпания запаса	
2.2.	пластичности на сталии поверхностного пластического	113
	леформирования	
	Аналитическая молель программы нагружения и	
2.3.	наслелственные закономерности исчерпания запаса	137
	пластичности на сталии циклической долговечности	
	Аналитическое описание закономерностей формирования и	
3.	трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя	167
	на стадиях упрочняющей обработки и эксплуатации	
2 1	Закономерности формирования остаточных напряжений	1(7
3.1.	поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки	16/
3.1.1.	Постановка задачи моделирования остаточных напряжений	167
	Аналитическое описание взаимосвязей компонент тензора	
3.1.2.	остаточных напряжений с режимами упрочняющей обработки	178
	поверхностным пластическим деформированием	
	Аналитическое описание взаимосвязей компонент тензора	
3.1.3.	остаточных напряжений с режимами упрочняющей обработки	185
	размерным совмещенным обкатыванием	
	Сравнительный анализ компонент тензора остаточных	
311	напряжений после упрочняющей обработки способами	205
5.1.4.	поверхностного пластического деформирования и размерного	203
	совмещенного обкатывания	
	Закономерности трансформации остаточных напряжений	
3.2.	поверхностного слоя на стадии циклического	208
	эксплуатационного нагружения	
3.2.1.	Постановка задачи моделирования	208
	Аналитическое описание наследственных закономерностей	
3.2.2.	трансформации состояния поверхностного слоя в процессе	216
	эксплуатационного циклического нагружения	_
	Заключение	230
	Список использованных источников	234

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день общепринятым является представление 0 трансформации структуры металла В наноразмерное состояние (c характерным размером структуры менее 100 нм) как об одном из эффективных способов существенного повышения эксплуатационных свойств изделий. Так, использование интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет повысить микротвердость титана в 1,9 раз, предел текучести более чем в 4 раза при сохранении удовлетворительной пластичности.

Дополнительное использование других технологических методов обработки позволяет создавать многофункциональные структурные наноразмерные поверхностные комплексы, обеспечивающие значительное повышение эксплутационных свойств деталей машин, работающих в экстремальных условиях эксплуатации.

При характерном размере структуры менее 100 нм традиционные подходы материаловедения и технологии машиностроения не позволяют в полной мере объяснить наблюдаемые закономерности формирования наноразмерной структуры и прогнозировать результат обработки.

Также рассмотрение поверхностного слоя на наноразмерном уровне позволяет выявить некоторые неясные до настоящего времени особенности происходящих на стадиях комбинированной упрочняющей процессов, обработки И эксплуатации деталей машин. В многочисленных существующих работах в области нанотехнологий основное внимание уделяется физическим основам нанотехнологий; методам исследования, анализа и аттестации наноструктур и наноматериалов; наноэлектронике, наносистемам И дp. Инженерные приложения деформационного эксплутационных наноструктурирования для повышения свойств традиционных деталей машин практически отсутствуют, что сдерживает создание и широкое применение новых совмещенных и комбинированных

упрочняющих технологий наноструктурирования в реальном секторе экономики.

Проект направлен на раскрытие наследственных физических закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния и остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин. Эти закономерности требуются для разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов и средств их автоматизации.

В рамках отчетного этапа:

1. Выполнено аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки и эксплуатации. Предложены математические наследственные модели, описывающие накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности по стадиям нагружения. Полученные модели позволяют с научных позиций проводить проектирование упрочняющей технологии на базе основных закономерностей механики технологического наследования. Предложен показатель схемы напряженного состояния и проведено моделирование релаксации напряженного состояния и изменения деформированного состояния на стадии циклической долговечности.

2. Разработаны аналитические моделей программ нагружения (ΠH) имеющих значительное количество участков квазимонотонной деформации. Предложено описание формирования И трансформации состояния поверхностного слоя в терминах и категориях программ нагружения, выделяемых на каждой операции механической обработки или эксплуатации как стадиях нагружения. Программы нагружения описывают накопление деформации в условиях изменяющихся схем наследуемого напряженного состояния металла поверхностного слоя в очаге пластической деформации. Стадии нагружения выделяются по признакам завершенности программ нагружения и разбиваются на ряд этапов квазимонотонной деформации,

которые определяют закономерности накопления и залечивания дефектов в поверхностном слое детали.

3. Разработано аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки и эксплуатации.

Представлена аналитическая модель процесса формирования И выполнены аналитические расчеты остаточных напряжений на стадиях упрочняющей обработки с учетом явления технологического наследования. Ключевой особенностью этого решения является представление остаточных напряжений в виде тензора, составляющими элементами которого являются упруго-пластические напряжения от нагрузки, идеально-упругие и тепловые разгрузки. Установлены закономерности распределения напряжения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя детали.

Представлена аналитическая модель процесса трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадии циклического эксплуатационного нагружения. Ключевой особенностью этого решения является представление о непрерывной релаксации тензора остаточных напряжений В процессе эксплуатационного нагружения на стадии циклической долговечности.

Полученные результаты позволяют составить новое представление о закономерностях формирования и трансформации свойств поверхностного слоя деталей машин в наследственной постановке.

На следующем этапе выполнения НИР планируется:

1. Разработка средств автоматизации проектирования упрочняющих технологических процессов.

2. Оценка эффективности полученных результатов и разработка рекомендаций по возможности использования результатов ПНИР в реальном секторе экономики и при создании научно-образовательных курсов.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ НАНОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ НАНОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССАХ КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

1.1. Механика формирования структурного и механического состояния поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием и размерным совмещенным обкатыванием

1.1.1. Постановка задач

Оценка механического состояния и влияния истории нагружения на стадиях упрочняющей обработки (УО) поверхностным пластическим деформированием (ППД) и размерным совмещенным обкатыванием (РСО) осуществлялись методом конечно-элементного моделирования в следующей последовательности:

- Проводились экспериментальные исследования в наследственной постановке. Образцы из стали 45 ГОСТ 1050-88 подвергались УО по различным режимам в несколько рабочих ходов вплоть до начала разрушения поверхностного слоя. Начало разрушения означало полное исчерпание запаса пластичности материалом поверхностного слоя детали.
- 2. Механические свойства материала, профили очагов деформации, результаты измерения твердости, шероховатости и других параметров

поверхностного слоя служили исходными данными при формировании начальных и граничных условий.

 Определение напряженно-деформированного состояния очагов деформации в категориях тензоров напряжений и относительных деформаций осуществлялось в плоско-деформированной постановке с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

В соответствии с принятой постановкой моделирования процесса УО создавались конечно-элементные модели, состоящие из обрабатываемой заготовки и индентора (ролика и для случая РСО - резца, подрезающего волну деформированного металла).

В упругопластическое тело в виде пластины с жестко закрепленной нижней границей внедрялся абсолютно жесткий индентор-ролик с профильным радиусом R_{np} . Индентору придавали смещение на величину подачи *S* вдоль оси абсцисс *x*. По оси ординат *y* перемещение отсутствовало.

Задача решалась в плоско-деформированной постановке. Это предполагало, что все деформационные процессы в ОД, происходят в плоскости продольного сечения, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки (плоскости подачи).

По мнению В.М. Смелянского, степень деформации ПС в процессах ППД взаимосвязана с размерами продольной волны. В пользу такой точки зрения автор приводит ряд аргументов [1]:

- высота волны в продольном направлении имеет значительно большие размеры, чем в поперечном;

 плоскость подачи с механической точки зрения в большей степени отвечает понятию главной плоскости, поскольку деформации в плоскости скорости вращения меньше аналогичных в плоскости подачи и др.

Таким образом, рассмотрение напряженно-деформированного состояния в плоскости подачи с высокой степенью достоверности отражает процессы, происходящие в ОД [1].

Плоско-деформированная постановка предполагает, что деформации возникают только в рассматриваемой плоскости, а тензор напряжений является условно объемным [2].

В таком случае напряженное состояние характеризуется 3-мя нормальными (σ_x , σ_y , σ_z) и одной касательной (σ_{xy}) составляющими, которые имеют ненулевые значения, касательная составляющая при этом действует в рассматриваемой плоскости:

$$[T\sigma]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & 0\\ \sigma_{xy} & \sigma_y & 0\\ 0 & 0 & \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \end{pmatrix}.$$
 (1.1)

Напряжения σ_z перпендикулярны рассматриваемой плоскости и являются полусуммой σ_x и σ_y . Остальные составляющие тензора напряжений имеют нулевые значения.

В то же время деформированное состояние характеризуется нормальными и касательными составляющими относительной деформации, которые действуют в рассматриваемой плоскости *XY*:

$$[T\varepsilon]_{xyz} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & 0\\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & 0\\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$
 (1.2)

Начальными и граничными условиями для моделирования являлись физические и механические свойства металла: модуль Юнга, плотность, коэффициент Пуассона, коэффициент трения, кривая течения, диаграмма пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p$ (П), режим УО, а также форма и геометрические размеры очага деформации (табл. 1.1).

Кривая течения материала аппроксимировалась двумя прямыми линиями (билинейная аппроксимация) (рис. 1.1). Для такого описания необходимо знать три параметра: модуль Юнга E, характеризующий угол наклона упругого участка α ; экстраполированный предел текучести σ_{3m} , соответствующий отрезку на оси напряжений, определяемому продолжением

участка пластического течения; тангенциальный модуль T_{mod} , характеризующий угол наклона участка пластического течения β .

Таблица 1.1

Физические и механические свойства металла, параметры кривой течения

Модуль Юнга	<i>Е</i> , МПа	$2x10^{11}$
Плотность	<i>ρ</i> , кг/м ³	7800
Коэффициент Пуассона	v	0,3
Коэффициент трения	η	0,21
Экстраполированный предел текучести	σ _{эm} , MΠa	$3,66 \times 10^8$
Тангенциальный модуль	<i>Т_{мод}</i> , МПа	2,596x10 ⁶



Рис. 1.1. Билинейная аппроксимация кривой течения

Упрочнение на каждой стадии задавалось в зависимости от истории нагружения по результатам наследственных экспериментов.

Полученные значения компонентов тензоров напряжений и деформаций в узлах конечно-элементной модели пересчитывались в точки линий тока очага деформации. Алгоритм перерасчета предполагал, что первая точка линии тока находится на передней внеконтактной границе очага

деформации. В процессе нагружения поверхностного слоя перемещение точки вдоль линии тока складывается из двух составляющих:

 перемещение, вызванное смещением очага деформации относительно инструмента на величину подачи;

• перемещение, обусловленное пластическом течением в очаге деформации.

Проводился пересчет тензоров деформаций в тензоры скоростей деформаций и оценка параметров схемы напряженного состояния, Лоде, интенсивности скоростей деформации сдвига, мгновенной (за этап) и накопленной степени деформации сдвига, степени использования запаса пластичности по различным моделям вдоль линий тока.

В качестве исходных данных для МКЭ–моделирования ППД использовались результаты экспериментального исследования обкатывания роликом образцов №№ 901.1, 901.2, 901.3. План экспериментального исследования представлен в таблице 1.2. Поверхность последовательно обкатывали в 3 рабочих хода по неизменяемому режиму. После 1-го рабочего хода (образец № 901.1), поверхность обкатывали вторым рабочим ходом (образец № 901.2) и третьим рабочим ходом (образец № 901.3)

В качестве исходных данных для МКЭ–моделирования РСО использовались результаты экспериментального исследования обработки образца № 107.1 (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Условия моделирования механики ОД при ППД и РСО (при ППД - разрушение поверхностного слоя после 3 рабочего хода)

Mo	Режим обработки					
JNº oбpagua	Рабочи	Л мм	S ,	n ,	R MM	Р , кгс (Н),
образца	й ход	$\boldsymbol{\nu}_p$, with	мм/об	об/мин	1 np, 141141	h д, мм
901.1	1					
901.2	2	95	0,21	630	2,5	250 (2500)
901.3	3					
1071	-	100	0,22	1275	3	0,2

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов предполагал, что:

- За 1 минуту совершается 630 смещений на величину подачи каждое индентора (ролика) относительно детали. Одно смещение на величину подачи 0,21 мм совершается за <u>1мин * 60c</u> <u>630об / мин</u> = 0,095c.
- 2. Коэффициент трения неизменен и составляет f = 0,21.
- 3. Перед первым рабочим ходом материал не упрочнен и его свойства соответствуют исходным. Перед каждым новым рабочим ходом проводилось моделирование упрочнения после предшествующего рабочего хода, которое задавали по результатам измерения твердости и использования взаимосвязи между твердостью И интенсивностью напряжений и деформаций.
- 4. Параметры механического состояния упрочненного поверхностного слоя после первого рабочего хода служили начальными условиями при решении задач механики при нагружении вторым рабочим ходом. В свою очередь, третье нагружение (обкатывание третьим рабочим ходом) предполагало использование параметров механического состояния, достигнутых после второго рабочего хода и т.д., вплоть до полного исчерпания запаса пластичности материалом поверхностного слоя. Проводилось построение программ нагружения И исследование "затухания" этих программ по мере исчерпания запаса пластичности. Проводилась оценка роли истории нагружения в исчерпании запаса пластичности на данной стадии нагружения, и формировались правила механики технологического наследования.
- 5. Упрочнение после предшествующего рабочего хода моделировали по двум схемам: принимали равномерным по глубине упрочненного слоя и равным упрочнению на поверхности и неравномерным, соответствующим распределению степени деформации по глубине поверхностного слоя.
- 6. Расчет остаточных напряжений производился с учетом упрочнения поверхностного слоя после каждого рабочего хода. Значение предела

текучести при сдвиге определялось по распределению твердости после предшествующего рабочего хода деформирующего инструмента.

По результатам расчетов проводилась оценка роли истории нагружения в исчерпании запаса пластичности по всем стадиям нагружения с формированием общих правил механики технологического наследования.

В результате конечно-элементного моделирования получены распределения компонент напряжений и деформаций, возникающих при УО ППД И РСО.

1.1.2. Оценка формирования структурного и механического состояния поверхностного слоя на стадии упрочняющей обработки поверхностным

пластическим деформированием после первого рабочего хода

Проведем анализ картины распределения параметров НДС в очаге деформации. Ниже на рисунках 1.2-1.5 представлены схемы распределения некоторых компонент тензора деформаций и тензора напряжений, полученные в результате МКЭ-моделирования.

Обращает на себя внимание тот факт, что пластическая деформация локализована в очаге деформации, контуры которого описываются по профилограммам. Анализ компонент напряженного состояния показывает, что в передней зоне очага деформации имеет место сжатие, а за инструментом–растяжение. Сдвиговая компонента пластической деформации отрицательна во всем объеме очага деформации, компонента ε_x отрицательна в передней зоне и положительна за деформирующим инструментом. Вдоль оси *у* компонента деформаций показывает растяжение в передней зоне и сжатие в задней зоне очаге деформации.

В целом качественная картина соответствует современным представлениям об НДС очага деформации при ППД [3].

Расчеты НДС и степени исчерпания запаса пластичности (СИЗП) проводились в каждой точке линии тока. Ввиду особенностей методики расчета невозможно определение параметров НДС на контуре очага

деформации. Вследствие этого проводилось построение распределений различных параметров по глубине и статистическая экстраполяция значений по координатам контура очага деформации. Размеры зоны расчета параметров НДС составили $x * y = (8 * 3) \ mm^2$.



Рис. 1.2. Распределение компоненты пластической деформации ε_x

в очаге деформации во время 1-го рабочего хода



Рис. 1.3. Распределение компоненты пластической деформации ε_v

в очаге деформации во время 1-го рабочего хода



Рис. 1.4. Распределение компоненты напряженного состояния σ_x в очаге деформации во время 1-го рабочего хода



Рис. 1.5. Распределение компоненты напряженного состояния *σ*_y в очаге деформации во время 1-го рабочего хода

Частицы металла попадают в зону очага деформации по левой границе и смещаются вдоль линий тока вправо, накапливая деформацию и поврежденность в условиях изменяющихся показателей схемы и вида напряженного состояния (рис. 1.6). На правой границе очага деформации происходит формирование окончательных свойств поверхностного слоя: напряженного и деформированного состояний, СИЗП, тензора остаточных напряжений. На поверхности детали за инструментом сформирована микрогеометрия поверхности.

Последовательно проследим изменение параметров НДС и оценим накопленные свойства вдоль линий тока и по глубине поверхностного слоя на правой границе очага деформации. Такая постановка позволяет рассматривать развитие деформации в зависимости от числа рабочих ходов индентора, по сути, в зависимости от истории нагружения.

В процессе поверхностного пластического деформирования картина распределения напряжений является достаточно сложной (рис. 1.7 - 1.10). В очаге деформации вдоль первой линии тока компоненты напряжений σ_x , σ_y , σ_z , σ_{xy} изменяются от нулевых значений на входе до минимальных отрицательных значений в зоне вершины пластической волны. Дальнейшее перемещение частицы вдоль этой линии тока происходит в условиях увеличения компонентов напряжений под И за инструментом. Максимального значения компоненты напряжений достигают в точке отрыва материала от инструмента. По абсолютной величине наибольшей является компонента σ_{v} , наименьшей - σ_{xv} , причем прослеживается идентичный характер изменения всех компонент. По мере перемещения вглубь поверхностного слоя изменяется как характер, так и абсолютные значения компонент напряженного состояния. В целом, абсолютные значения уменьшаются; максимальной по-прежнему остается компонента σ_{v} .

Такой характер распределения напряжений приводит к тому, что большая часть материала очага деформации находится в условиях сжатия, причем наибольшее значение среднего нормального напряжения соответствует зоне контакта инструмента с деталью (рис. 1.9). Наибольшие значения интенсивности касательных напряжений имеют место в зоне вершины волны перед деформирующим инструментом. При перемещении вглубь поверхностного слоя происходит уменьшение абсолютных значений,

однако характер распределения этих компонент практически не изменяется (рис. 1.10).











Рис. 1.8. Распределение компонент напряженного состояния вдоль 12-ой

линии тока



Рис. 1.9. Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.10. Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений вдоль 12-ой линии тока



Рис. 1.11. Распределение компонент скорости деформации вдоль 1-ой линии тока

Весьма сложной является картина распределения скоростей деформации. Вдоль 1-ой линии тока компонента ξ_x постепенно уменьшается,

достигая минимального значения $\xi_x = -0,21 \ c^{-1}$ в зоне перед вершиной пластической волны (рис. 1.11). На сравнительно небольшом протяжении линии тока в районе вершины волны происходит резкая смена знака; численное значение этой компоненты резко возрастает, достигая максимального значения, равного $\xi_x = +0,49 \ c^{-1}$ на вершине волны. Затем происходит уменьшение до $\xi_x = -0,12$ в точке отрыва инструмента от поверхности детали и увеличение до нуля за инструментом.

Противоположный характер имеет распределение компоненты ξ_y : перед вершиной волны численное значение возрастает до $\xi_y = +\theta, 26 \ c^{-1}$, затем резко уменьшается, меняет знак, принимая наименьшее значение $\xi_y = -\theta, 65 \ c^{-1}$ в области вершины волны. В области вершины волны наблюдаются и максимальные сдвиги; компонента ξ_{xy} резко изменяется от -0,9 до 0,65 c⁻¹. В зоне под и за инструментом происходит постепенное снижение численного значения этой компоненты до нулевого значения.

Вглубь поверхностного слоя происходит уменьшение всех компонент, и вдоль 12-й линии тока численные значения компонент скорости деформации находятся в пределах – $0,0007 \le \xi_{ij} \le +0,0018$ с⁻¹ (рис. 1.12).

Преобразования тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций позволили определить распределение параметров схемы, Лоде и степени деформации сдвига в очаге деформации вдоль линий тока и по глубине поверхностного слоя (рис. 1.13). Подчеркнем важную закономерность, установленную ранее в работах В.М. Смелянского, а именно: вдоль каждой из рассматриваемых 12-ти линий тока можно выделить 3 участка квазимонотонной деформации.

Первый участок – от точки входа в очаг деформации до точки, расположенной в районе вершины волны. На этом участке показатель схемы напряженного состояния изменяет свое значение от $\Pi \approx (-\theta, 5...-\theta, 57)$ на входе в очаг деформации до $\Pi = -2,2$ в районе вершины волны. Показатель вида напряженного состояния (показатель Лоде) монотонно уменьшает свое

значение от $\mu_{\sigma} = +0,37$ до $\mu_{\sigma} \approx 0$. Таким образом, в районе вершины волны созданы условия для накопления больших деформаций: отрицательный показатель схемы и состояние сдвига. Действительно, именно в районе вершины волны наблюдается наибольшее значение мгновенной степени деформации сдвига Λ' .

Второй участок – от вершины волны до точки, расположенной в районе отрыва инструмента от поверхности детали. Здесь показатель схемы уменьшает свое значение до $\Pi = -2,5$, а затем возрастает до $\Pi = +0,5$ в районе точки отрыва. Показатель Лоде, в свою очередь, монотонно увеличивает свое значение от $\mu_{\sigma} \approx 0$ до $\mu \sigma = +0,24$. Интенсивность прироста степени деформации сдвига в условиях "мягкой" схемы нагружения снижается.



Рис. 1.12. Распределение компонент скорости деформации вдоль 12-ой линии тока

Наконец, третий участок – от точки в районе отрыва инструмента от поверхности детали до точки выхода из очага деформации. Показатель схемы

здесь почти не изменяется, находясь на уровне $\Pi = +0,5$. Показатель Лоде монотонно уменьшается до уровня $\mu_{\sigma} = -0,33$.



Рис. 1.13. Распределение параметра схемы, Лоде, мгновенной и накопленной степени деформации сдвига вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.14. Накопление степени деформации сдвига вдоль 1-6 линий тока

Такой характер схемы нагружения приводит к тому, что наиболее интенсивно накопление деформаций происходит на первом участке – от точки входа в очаг деформации до точки, расположенной в районе вершины волны – так называемой передней зоне очага деформации (рис. 1.14). Накопленная степень деформации сдвига на первом участке составляет $\Lambda_1 = 0,67$, на втором - $\Lambda_2 = 0,094$, и на третьем - $\Lambda_1 = 0,001 - 0,002$, что в процентном соотношении составляет 93, 6 и 1 % соответственно. Эти соотношения практически не изменяются по мере перемещения вглубь поверхностного слоя.

Наибольшая часть деформации сдвига накапливается в поверхностном слое глубиной до 0,4 мм – $\Delta A = 0,64$; в слое от 0,4 до 0,9 мм накопленная степень деформации сдвига составляет $\Delta A = 0,05$; перемещение вглубь поверхностного слоя от 0,9 мм добавляет к накопленной степени деформации сдвига $\Delta A = 0,025$ (рис. 1.15). Степень деформации сдвига, полученная экспериментально путем измерения твердости по Виккерсу, подтверждает правомерность анализируемых результатов. Распределение степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя описано выражением:

$$A = 2,68 \exp(-6,1h). \tag{1.3}$$

Для понимания процессов исчерпания запаса пластичности рассмотрим изменение степени деформации сдвига от показателя схемы напряженного состояния – программы нагружения поверхностного слоя (рис. 1.16). Для 1, 2 и последующих линий тока программы нагружения также имеют три четко выраженных участка с характерными точками перегиба. Эти точки соответствуют ранее полностью выявленным точкам смены вида напряженного состояния. Кроме того, обнаружено "затухание" программ нагружения по глубине поверхностного слоя. Можно видеть, что "затухание программ нагружения заключается в существенном уменьшении диапазона изменения показателя схемы и степени деформации сдвига, накопленной на данной глубине поверхностного слоя.

Наличие участков квазимонотонной деформации приводит к частичному залечиванию дефектов (рис. 1.17). Видно, что наибольшее приращение дефектности имеет место в районе вершины пластической волны. Распределение СИЗП по глубине поверхностного слоя имеет ниспадающий характер (рис. 1.18), причем наибольшее значение отмечено в слое глубиной до 0,4 мм.

Таким образом, после первого рабочего хода сформировано определенное состояние поверхностного слоя, которое определяет стартовые условия для деформирования вторым рабочим ходом инструмента.



Рис. 1.15. Распределение накопленной степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя вдоль задней границы очага деформации:
1 - по результатам МКЭ-моделирования; 2 - по распределению твердости



Рис. 1.16. Программа нагружения вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.17. Исчерпание запаса пластичности вдоль 1-12 линии тока по модели Калпина-Филиппова



Рис. 1.18. Распределение степени исчерпания запаса пластичности по глубине упрочненного поверхностного слоя по модели Калпина-Филиппова

1.1.3. Оценка формирования структурного и механического состояния поверхностного слоя на стадии упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием после второго рабочего хода с учетом

наследуемых свойств поверхностного слоя

После первого рабочего хода произошло упрочнение материала, которое характеризуется определенной накопленной степенью деформации сдвига, частичным исчерпанием запаса пластичности и возникновением остаточных напряжений. Второе внедрение инструмента и последующее его перемещение в направлении подачи приводит к возникновению нового очага деформации и полному снятию остаточных напряжений, возникших после первого рабочего хода. Формирование поверхностного слоя происходит под влиянием наследуемых свойств. Определим степень и характер этого влияния в категориях и терминах механики деформирования.

Для решения задачи упрочняемого тела в процессе обработки вторым рабочим ходом задавалось распределение наследуемых свойств по глубине

Для поверхностного слоя. ЭТОГО ПО распределению твердости В поверхностном слое после первого рабочего хода и тарировочному графику, построенному в координатах "интенсивность деформаций ε_i -твердость по Виккерсу *HV* ", определялось распределение интенсивности деформаций ε_i . влияния задания упрочнения производилась Оценка способа путем использования различных моделей распределения интенсивности деформаций по глубине поверхностного слоя.

По первому способу задавалось равномерное упрочнение, т.е. по всей глубине поверхностного слоя принимались неизменными твердость и, соответственно, интенсивность деформаций. После первого рабочего хода эти параметры составили: *HV*195 и $\varepsilon_i = 0,1425$.

По второму способу задавалась эпюра упрочнения, и производилось послойное разбиение, которое заключалось в задании распределения интенсивности деформаций по распределению твердости в поверхностном слое после первого рабочего хода. Численные значения параметров послойного разбиения представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Глубина, мм	Твердость, <i>HV</i>	ε
0	195	0,1425
0,24	193	0,133146
0,48	186	0,095862
0,72	183	0,077553
0,96	177	0,041454
1,2	175	0,029548
1,44	173	0,017694
1,68	172	0,011785
1,92	170	0

Параметры послойного разбиения

С целью идентификации НДС каждой материальной частицы очага деформации и поверхностного слоя при решении задачи упрочняемого тела заданными являлись координаты точек линий тока на входе в очаг

деформации. Эти координаты соответствовали координатам точек линий тока на выходе из очага деформации после первого рабочего хода.

В таблице 1.4 приведены ординаты расположения линий тока от поверхности детали в точке старта программы нагружения и достигнутые значения степени деформации сдвига и показателя схемы на финише программы нагружения для случая задания равномерного упрочнения по глубине поверхностного слоя.

Таблица 1.4

Значения степени деформации сдвига и показателя схемы на финише

№ линии	Расстояние от	Λ	Π
тока	поверхности, мм		
0	0	-	-
1	0,422	0,126	0,313
2	0,636	0,092	0,482
3	0,848	0,072	0,521
4	1,060	0,057	0,538
5	1,274	0,048	0,534
6	1,487	0,041	0,540
7	1,702	0,036	0,540
8	1,919	0,032	0,521
9	2,134	0,030	0,540
10	2,350	0,027	0,529
11	2,565	0,026	0,544

программ нагружения

В целом, качественная картина распределения компонент напряженнодеформированного состояния не претерпела сколько-нибудь существенных изменений (рис. 1.19-1.27). Однако, видно, что:

- Уровень напряжений снизился в 5-7 раз (рис. 1.19);
- Среднее нормальное напряжение σ и интенсивность касательных напряжений *T* в районе вершины пластической волны уменьшились соответственно в 20 и 5 раз (рис. 1.20);
- Интенсивность скоростей деформации сдвига *H* в районе вершины пластической волны уменьшилась в 3,5 раза (рис. 1.21);

 По-прежнему, в очаге деформации существуют 3 участка квазимонотонной деформации со сменой знака в районе вершины волны и на выходе из очага деформации (рис. 1.22).

Принципиальным отличием является то, что история нагружения оказывает весьма существенное влияние на формирование программы нагружения (рис. 1.24). Программа нагружения (ПН) в сравнении с первым нагружением "сжата" по осям координат. Первый этап квазимонотонного нагружения стартует при показателе напряженного состояния $\Pi = -0,533$, а накопление деформации происходит при почти неизменном значении этого показателя. На втором этапе происходит плавное изменение показателя до $\Pi = 0,39$, а на третьем - изменение до $\Pi = 0,271$. В итоге изменилась структура накопленной деформации и по этапам это составляет 48, 48 и 4 % соответственно.

В целом, характер распределения степени деформации сдвига и показателя исчерпания запаса пластичности по глубине поверхностного слоя не изменились: наибольшие значения этих показателей соответствуют упрочненной поверхности (рис. 1.23. 1.26). Кроме уровню того, обнаруживаются аналогичные закономерности исчерпания запаса пластичности вдоль первой линии тока независимо от того, по каким критериям проводился расчет (рис. 1.25).



Рис. 1.19. Распределение компонент напряженного состояния вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.20. Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.21. Распределение компонент скорости деформации и интенсивности скоростей деформаций сдвига вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.22. Распределение параметра схемы, Лоде, мгновенной и накопленной степени деформации сдвига вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.23. Распределение накопленной степени деформации сдвига по глубине вдоль задней границы очага деформации: 1 - по результатам моделирования; 2 - по распределению твердости



Рис. 1.24. Программа нагружения вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.25. Исчерпание ресурса пластичности вдоль 1-ой линии тока:
1 - мгновенные значения; 2 - по линейной модели В.Л. Колмогорова;
3 - по нелинейной модели А.А. Богатова; 4 - по модели Ю.Г. Калпина




Однако, как было установлено, при МКЭ-моделировании более объективной является картина НДС ОД при задании неравномерных исходных свойств после первого рабочего хода по глубине ПС.

В таблице 1.5 приведены ординаты расположения линий тока от поверхности детали в точке старта программы нагружения и достигнутые значения степени деформации сдвига и показателя схемы на финише программы нагружения для случая задания неравномерного упрочнения по глубине поверхностного слоя.

Таблица 1.5

Значения степени деформации сдвига и показателя схемы на финише

№ линии	Расстояние от	٨	Π	
тока	поверхности, мм	Л	11	
0	0	-	-	
1	0,301	-	0,407	
2	0,509	0,173	0,468	
3	0,721	0,143	0,472	
4	0,936	0,083	0,510	
5	1,157	0,054	0,377	
6	1,382	0,045	0,253	
7	1,609	0,03	0,498	
8	1,839	0,019	-0,555	
9	2,071	0,017	-0,439	
10	2,303	0,011	-0,308	
11	2,535	0,01	-0,256	

программ нагружения

Большая детализация описания распределения исходного упрочнения и исчерпания ресурса пластичности приводит к тому, что в районе точек смены знака деформации численные значения всех компонент НДС несколько выше, чем при задании равномерного упрочнения. Иными словами, полученные результаты достаточно чувствительны к способу и детализации описания.

Так. например, уровень напряжений скоростей компонент И деформаций примерно 1,5 при В раза выше, чем использовании предшествующего описания (рис. 1.28 - 1.36). Видно, что в области вершины

волны по-прежнему обнаруживаются достаточно жесткие условия для накопления деформации и исчерпания ресурса пластичности.



Рис. 1.28. Распределение компонент напряженного состояния (кгс/мм²) вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.29. Распределение компонент скорости деформации и интенсивности скоростей деформаций сдвига вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.30. Распределение параметра схемы, Лоде, мгновенной и накопленной степени деформации сдвига вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.31. Накопление степени деформации сдвига вдоль 1-6 линий тока



Рис. 1.32. Распределение накопленной степени деформации сдвига по глубине вдоль задней границы очага деформации: 1 - по результатам моделирования; 2 - по распределению твердости



Рис. 1.33. Программа нагружения вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.34. Исчерпание СИЗП вдоль линий тока по модели Калпина-Филиппова



Рис. 1.35. Распределение СИЗП по глубине упрочненного поверхностного слоя по модели Калпина-Филиппова

В целом, характер программы нагружения и распределения степени деформации сдвига и СИЗП неизменен (рис. 1.33 - 1.35).

С целью проведения последующих расчетов распределение степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя описано уравнением:

$$\Lambda = 0,41 \exp(-1,63h). \tag{1.4}$$

В дальнейшем принято целесообразным использование результатов расчетов, в основе которых лежит представление о реальном неравномерном характере распределения параметров упрочнения и СИЗП по глубине поверхностного слоя.

1.1.4. Оценка формирования структурного и механического состояния поверхностного слоя на стадии упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием после третьего рабочего хода с учетом

наследуемых свойств поверхностного слоя

После второго рабочего хода увеличилось упрочнение материала, деформации возросла накопленная степень сдвига, произошло дополнительное исчерпание запаса пластичности и возникли новые остаточные напряжения. Механическое состояние поверхностного слоя после второго рабочего хода, как было показано выше, зависит от наследуемых свойств. В категориях механики можно говорить о том, что на формирование поверхностного слоя влияет история нагружения, т.е. история развития пластической деформации.

Третье внедрение инструмента и последующее его перемещение в направлении подачи приводит к возникновению очага деформации, характеризуемого параметрами, которые формируются под воздействием наследуемых свойств поверхностного слоя. Возникновение очага пластической деформации означает полное снятие остаточных напряжений от предшествующей обработки.

В соответствии с принятой методикой было задано неравномерное упрочнение поверхностного слоя, параметры которого представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Глубина, мм	Твердость, <i>HV</i>	$\boldsymbol{\varepsilon}_i$
0	226	0,4195
0,24	222	0,349113
0,48	200	0,184698
0,72	190	0,120607
0,96	178	0,047429
1,2	175	0,029548
1,44	173	0,017694
1,68	172	0,011795
1,92	170	0

Параметры модели неравномерного упрочнения поверхностного слоя

В таблице 1.7 приведены ординаты расположения линий тока от поверхности детали в точке старта программы нагружения и достигнутые значения степени деформации сдвига и показателя схемы на финише программ нагружения для случая неравномерного упрочнения.

Оценим напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя для случая задания неравномерного упрочнения.

В характере распределении компонент напряженного состояния не обнаруживаются сколько-нибудь существенные отличия от характера распределения соответствующих параметров поверхностного слоя во время 2-го нагружения (рис. 1.37 - 1.46). Видно, что уровень напряжений несколько снизился, а экстремумы эпюр σ_y и σ_z сместились к области контакта деформирующего инструмента с деталью.



Рис. 1.37. Распределение компонент напряженного состояния (кгс/мм²) вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.38. Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений (кгс/мм²) вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.39. Распределение компонент скорости деформации и интенсивности скоростей деформаций сдвига вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.40. Распределение параметра схемы, Лоде, мгновенной и накопленной степени деформации сдвига вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.41. Распределение накопленной степени деформации сдвига по глубине вдоль задней границы очага деформации: 1 - по результатам моделирования; 2 - по распределению твердости



Рис. 1.42. Накопление степени деформации сдвига вдоль 1-6 линий тока

Значения степени деформации сдвига и показателя схемы на финише

№ линии	Расстояние от	Α	Π
тока	поверхности, мм	Л	11
0	0	-	-
1	0,378	0,164	0,288
2	0,562	0,154	0,267
3	0,755	0,164	-0,174
4	0,957	0,085	0,502
5	1,170	0,054	-0,457
6	1,390	0,041	-0,182
7	1,614	0,023	0,475
8	1,842	0,013	-0,477
9	2,073	0,009	-0,456
10	2,304	0,009	-0,422
11	2,536	0,005	-0,408

программ нагружения для неравномерного упрочнения

Снизился уровень численных значений компонент скорости деформации ξ_x и ξ_y при почти неизменных значениях сдвиговой компоненты ξ_{xy} (рис. 1.39). Однако существенно выросли значения интенсивности скоростей деформации сдвига и диапазон их распределения вдоль 1-ой линии тока.

Ввиду некоторого смещения экстремумов компонент НДС в контактную область произошло и смещение точек смены знака деформации при сохранении общей закономерности изменения параметра Лоде (рис. 1.40).

Программа нагружения вдоль 1-ой линии тока на этой стадии нагружения еще более "сжата" по осям координат (рис. 1.43). Старт первого этапа происходит при показателе схемы напряженного состояния $\Pi = -0,632$; в течение этого этапа накапливается около 48% всей деформации этой стадии нагружения. На втором квазимонотонном этапа накапливается около 49% деформации, а сам этап финиширует при показателе схемы $\Pi = 0,365$. Третий квазимонотонный этап позволяет накопить всего около 3% от общей деформации данной стадии нагружения при финишном значении показателя

схемы $\Pi = 0,288$. Как видно, структура накопленной деформации вдоль 1-ой линии тока по этапам квазимонотонной деформации практически не изменяется.

В сравнении со 2-ой стадией нагружения не обнаруживаются существенные отличия в качественной картине и количественных значениях степени деформации сдвига и СИЗП по глубине поверхностного слоя (рис. 1.41 и 1.45), а также в распределении СИЗП вдоль первой линии тока (рис. 1.44). Распределение степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя описано выражением:

$$\Lambda = 0,31 \exp(-1,46h). \tag{1.5}$$

В этом смысле можно говорить о "затухании" изменения и накопления деформаций и СИЗП во время 3-го рабочего хода.



Рис. 1.43. Программа нагружения вдоль 1-ой линии тока



Рис. 1.44. Исчерпание ресурса пластичности вдоль линий тока по модели Калпина-Филиппова



Рис. 1.45. Распределение СИЗП по глубине упрочненного поверхностного слоя по модели Калпина-Филиппова

Все это говорит о том, что наступило определенное предельное состояние материала, характеризуемое предельной суммарной деформацией и исчерпанием ресурса пластичности. В дальнейшем было проведено МКЭ-моделирование состояния очага деформации во время 4-го рабочего хода, которое показало, что предельное состояние материала наступило уже во время 3-го рабочего хода инструмента. В процессе обработки четвертым рабочим ходом на поверхности обработанной детали были обнаружены четкие следы отслоившегося материала в виде "рыбьей чешуи", а на профилограммах шероховатости видны частицы отслоившегося металла.

Таким образом, поверхностный слой после трех рабочих ходов инструмента характеризуется рядом параметров: суммарной предельной степенью деформации сдвига, нулевым запасом пластичности и итоговым тензором остаточных напряжений. Последующий анализ профилограмм шероховатости, профилограмм очагов деформации и распределения твердости подтвердил правомерность такого утверждения.

Анализ истории нагружения показывает, что каждое нагружение увеличивает степень деформации сдвига, снижает запас пластичности и приводит к трансформации тензора остаточных напряжений. Очевидно, что остаточное напряженное состояние упрочненного поверхностного слоя определяется соотношениями между напряженным и деформированным состоянием и зависит от накопленной степени деформации сдвига и характера ее распределения по глубине.

1.1.5. Оценка формирования структурного и механического состояния поверхностного слоя на стадии упрочняющей обработки размерным совмещенным обкатываниием

В результате конечно-элементного моделирования получены распределения компонент напряжений (рис. 1.46, а-в), а также компонент деформаций (рис. 1.46, а-в), возникающих при РСО. Полученные распределения позволили сформировать представления о закономерностях

процессов, протекающих в очаге деформации, оценить максимальные напряжения и деформации, выделить области их локализации.

Установлено, что наиболее высокая концентрация сжимающих напряжений (рис. 1.46, а-в) по всем осям локализована в зоне передней контактной поверхности ролика.

Наибольших сжимающих значений (до $-700 M\Pi a$) достигает компонент, перпендикулярный оси детали (σ_y). Осевой компонент (σ_x) также характеризуется высокими (до $-500 M\Pi a$) значениями. Указанные максимумы наблюдаются в зоне передней контактной поверхности и в районе вершины ролика (рис. 1.46, а-б).

По всей передней внеконтактной поверхности, по мере приближения к линии среза вершины волны, наблюдается активный рост сжимающих напряжений σ_x , который прекращается в точке ее перехода в поверхность контакта с резцом (рис. 1.46, а). Какого-либо изменения σ_y вдоль указанной траектории не происходит (рис. 1.46, б).

В зоне контакта с резцом наблюдается некоторое снижение (примерно на *90-100 МПа*) сжимающих значений компонента σ_y , что, по мнению автора, вызвано процессом съема металла в этой зоне.

По задней контактной и внеконтактной поверхностям наблюдаются незначительные (до *100 МПа*) растягивающие напряжения σ_x . Остальные напряжения в зоне задней поверхности практически не меняются.

Касательный компонент σ_{xy} в целом характеризуется меньшими значениями сжимающих напряжений, достигающими –250 МПа.

Выявлено, что на передней внеконтактной поверхности, по мере приближения к резцу, наблюдается рост сжимающих значений σ_{xy} , который прекращается в точке входа металла в зону резца. В районе вершины ролика наблюдается локализация растягивающих касательных напряжений величиной до *100 МПа* (рис. 1.46, в).



Рис. 1.46. Распределение компонент напряженного состояния (МПа)

Наибольший перепад всех компонент напряжений наблюдается в зоне при вершине деформирующего ролика. Здесь высокие значения сжимающих напряжений в районе передней контактной поверхности переходят в околонулевые (рис. 1.46, б) или растягивающие (рис. 1.46, а, в) напряжения в районе задней контактной поверхности ролика. Величина градиента достигает 2200 МПа на 1 мм длины очага деформации.

Относительная деформация в основном локализована в области передней внеконтактной поверхности ОД и зоне контакта с резцом (рис. 1.47, а-в). Нормальный ε_x и касательный ε_{xy} компоненты в целом характеризуются отрицательными значениями, а компонент ε_y – положительными. Наибольшие абсолютные значения имеет относительная деформация сдвига ε_{xy} (рис. 1.47, в).

Возрастая по передней внеконтактной поверхности ОД, наибольшие значения всех компонент относительных деформаций наблюдаются в зоне ее вершины, где передняя внеконтактная поверхность переходит в поверхность контакта с резцом. Значения относительных деформаций в этой точке составляют: $\varepsilon_x = 0,21$, $\varepsilon_y = 0,175$ и $\varepsilon_{xy} = -0,71$. Непосредственно в зоне контакта с резцом значения деформаций несколько снижаются.

На передней контактной поверхности ролика имеется еще одна область, характеризуемая значениями: $\varepsilon_x = 0,02$, $\varepsilon_y = -0,02$, $\varepsilon_{xy} = -0,24$.

В целом напряженно-деформированное состояние ОД при РСО аналогично полученному при ППД на основе применения базовой модели В.М. Смелянского. Отличие заключается в том, что при ППД наибольшие значения сжимающих напряжений приходятся на вершину пластической волны, а при РСО локализованы в районе передней контактной поверхности Наибольшая относительная деформация при РСО ролика. напротив наблюдается в зоне передней внеконтактной поверхности и в зоне контакта с Такие особенности напряженно-деформированного резцом. состояния вершины пластической волны деформированного срезанием вызваны металла.











в) *Е*ху

Рис. 1.47. Распределение компонент относительных деформаций

Численные значения параметров напряженно-деформированного состояния в точках линий тока позволили рассчитать характеристики

механического состояния поверхностного слоя как вдоль линий тока, так и по глубине поверхностного слоя: показатель схемы напряженного состояния Π , степень деформации сдвига Λ , по диаграмме пластичности и найденному показателю схемы – предельную степень деформации сдвига Λ_p , а по степени деформации сдвига и Λ_p - степень исчерпания запаса пластичности Ψ .

Наибольший интерес представляет рассмотрение параметров напряженно-деформированного состояния В очаге деформации вдоль формирующей обработанную некоторой критической линии тока, поверхность. В зоне передней внеконтактной поверхности эта линия расположена на глубине, равной величине припуска, срезаемого резцом.

Ниже представлены распределения компонент тензора напряженнодеформированного состояния, возникающего в ОД вдоль указанной ЛТ (рис. 1.48 - 1.53). В точке *А* зарождения пластической волны все компоненты напряженно-деформированного состояния имеют нулевые значения.

Сжимающие нормальные напряжения по всем направлениям нарастают фактически всей передней внеконтактной вдоль поверхности очага деформации AC_{1} , поверхности контакта с резцом и достигают своих максимальных сжимающих значений -600...-800 МПа в зоне передней контактной поверхности ролика $C_2 D$ (рис. 1.48). На участке $C_2 D$ наблюдается наиболее резкий перепад напряжений, достигающий 800 МПа на участке ОД длиной 0,5 мм, и происходит разгрузка с некоторым переходом в область растягивающих напряжений в районе вершины ролика (точка **D**) и точки отрыва ролика от поверхности детали (точка *E*). Наибольшие растягивающие значения напряжений в вершине ролика (точка **D**) имеет осевой компонент σ_x $= 200 M\Pi a.$

Касательный компонент напряженного состояния σ_{xy} имеет аналогичный нормальным характер распределения, однако отличается меньшими значениями, экстремум составляет около $\sigma_{xy} = -200 M\Pi a$.



Рис. 1.48. Распределение компонент тензора напряжений $[T\sigma_{PCO}]$

Интенсивность касательных напряжений T нарастает по передней внеконтактной поверхности ОД и достигает максимальной величины 200 *МПа*, стабилизируясь на этом уровне в зоне срезания пластической волны C_1C_2 и зоне передней контактной поверхности ролика C_2D (рис. 1.49). Затем T постепенно уменьшается к точке F выхода из очага деформации. Наибольший перепад значений интенсивности касательных напряжений наблюдаются в точке перехода передней внеконтактной поверхности в поверхность контакта с резцом (точка C_1), а также в районе вершины ролика (точка D).



Рис. 1.49. Распределение интенсивности касательных напряжений *T* и среднего нормального напряжения *σ*

Среднее нормальное напряжение σ на всем протяжении передней контактной и внеконтактной поверхности ОД имеет отрицательные значения. На контуре передней контактной поверхности ролика в точке наиболее резкого изменения направления линий тока σ принимает наибольшее по абсолютной величине отрицательное значение. Далее σ увеличивается до нуля, принимая незначительные положительные (около 50 *МПа*) значения в районе вершины ролика (точка *D*). Такой характер распределения напряжений говорит о том, что большая часть металла очага деформации находится в условиях сжатия.

В.Ю. Блюменштейном были проведены исследования механики процесса ППД при обкатывании роликом образцов из стали 45 (*160..180 HV*, ГОСТ 1050-88). Обработка проводилась по режиму: $R_{np} = 2,5 \text{ мм}, P = 2500 \text{ H}, D_0 = 50 \text{ мм}, D_p = 95 \text{ мм}, S = 0,21 \text{ мм/об}, n = 630 \text{ об/мин}$ [3].

Анализ показал, что, несмотря на значительный натяг ролика, свойственный РСО, качественная картина распределения напряжений аналогична картине напряжений, возникающей при ППД.

Наибольшее значение среднего нормального напряжения при ППД соответствует зоне контакта инструмента с деталью, что имеет место и при РСО.

Весьма сложной является картина распределения скоростей деформации (рис. 1.50). Осевой компонент ξ_x , на участке AC_1 увеличивается, принимая максимальное значение $\xi_x = 0,25 \ c^{-1}$ в зоне среза пластической волны (участок C_1C_2). Далее происходит смена знака; на протяжении поверхности ролика численное значение передней контактной ξr уменьшается и принимает минимальные значения $\xi_x = -0,2 \ c^{-1}$, не достигая вершины ролика. Затем, на сравнительно небольшом участке до вершины ролика (точка **D**) происходит увеличение ξ_x до нулевых значений.

Радиальный компонент ξ_y на всем протяжении ОД по абсолютным значениям равен осевому и имеет симметричный компоненту ξ_x характер распределения.

Расположение экстремумов касательного компонента ξ_{xy} практически повторяет экстремумы рассмотренных ξ_x и ξ_y . Касательный компонент достигает своего первого экстремума в зоне среза пластической волны, принимая, однако, большие ($\xi_{xy} = -0.4 \ c^{-1}$) абсолютные значения. Далее происходит резкий переход в область положительных значений, в результате которого ξ_{xy} принимает значение $+0.4 \ c^{-1}$ в точке второго экстремума, расположенного на передней поверхности в районе вершины ролика.



Рис. 1.50. Распределение компонент тензора скоростей деформации $[T\xi_{i,i}]$

В зоне задней поверхности ОД (DF) все компоненты остаются неизменными и имеют близкие к нулю значения.

Таким образом, максимальные мгновенные значения компонент скоростей деформации наблюдаются на поверхности контакта с резцом. Второй, несколько меньший по абсолютным значениям, экстремум приходится на переднюю контактную поверхность ролика в районе точки **D**.

На наш взгляд, наличие первого экстремума объясняется пластическим перемещением наиболее деформированного слоя металла в направлении режущей кромки. Причиной второго экстремума является значительный перепад компонент напряженного состояния в этой зоне очага деформации,

что вызывает значительное обратное течение металла ОД, формирующего обработанную поверхность (рис. 1.48).

Распределение скоростей деформаций вдоль критической ЛТ при РСО в целом имеет такую же качественную картину, как и распределение скоростей деформации вдоль поверхности ОД при ППД [3].

Анализ показал, что при обработке РСО, также как и при традиционном ППД, в очаге деформации можно выделить 3 участка квазимонотонной деформации. На границах этих зон нарушается монотонность деформации, т.е. изменяется ее знак, что приводит к частичному восстановлению запаса пластичности металла (рис. 1.51).

На первом участке квазимонотонной деформации – от точки A входа в очаг деформации до точки, расположенной на передней контактной поверхности в районе вершины ролика показатель схемы напряженного состояния изменяет свое значение от $\Pi = \theta$ до $\Pi = -3$. Показатель вида напряженного состояния (показатель Лоде) увеличивает свое значение и достигает максимума также на передней поверхности ролика ($\mu = +0, 4$).

На втором небольшом участке квазимонотонной деформации, расположенном на передней контактной поверхности ролика, до точки E в районе отрыва инструмента от поверхности детали, показатель схемы возрастает до $\Pi = +0,6$ в районе точки отрыва. Показатель Лоде, в свою очередь, монотонно уменьшает свое значение от $\mu = +0,4$ до $\mu = -0,4$.

На третьем участке – от точки *E* отрыва инструмента от поверхности детали до точки *F* окончания упруго-пластического восстановления металла детали показатель схемы здесь монотонно уменьшается до уровня $\Pi = +0,3$, показатель Лоде, в свою очередь, монотонно возрастает до уровня $\mu = -0,3$.



Рис. 1.51. Распределение показателя схемы напряженного состояния **П** и параметра Лоде **µ**

Установлено, что вдоль передней поверхности (AC_I), вплоть до встречи с резцом происходит интенсивный прирост степени деформации сдвига $\Delta\Lambda$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Delta\Psi$, далее абсолютные значения прироста $\Delta\Lambda$ и $\Delta\Psi$ в условиях «мягкой» схемы нагружения на втором квазимонотонном участке уменьшаются (рис. 1.52).

Анализ показал, что при РСО, вследствие применения большого натяга и срезания пластической волны, до точки встречи с роликом на участке AC_1C_2 накапливается 66% степени деформации сдвига и 77% степени исчерпания запаса пластичности (рис. 1.53).



Рис. 1.53. Распределение мгновенных значений степени деформации сдвига *ДА* и степени исчерпания запаса пластичности *ДΨ*

Похожие соотношения имеют место и при традиционной обработке ППД: накопленные значения составили $\Lambda_{\Pi\Pi\Pi} = 69\%$ и $\Psi_{\Pi\Pi\Pi} = 58\%$ [3].

Однако при РСО на участке AC_1C_2 наблюдается меньший прирост СДС и несколько больший в сравнении с ППД прирост значения СИЗП. На участках C_2D и *DEF* накапливается 34% деформации и на 23% дополнительно исчерпывается запас пластичности. В итоге накопленные значения степени деформации сдвига и степени исчерпания запаса пластичности по участкам контура очага деформации составили значения, представленные в таблице 1.8.



Рис. 1.53. Распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени исчерпания запаса пластичности Ψ ($\Psi = 1$ - полное исчерпание запаса пластичности)

Итоговые абсолютные значения этих параметров существенно различаются: для РСО численные значения составляют $\Lambda_{PCO} = 3,0$ и $\Psi_{PCO} = 0,65$, а для ППД - $\Lambda_{\Pi\Pi Д} = 0,715$ и $\Psi_{\Pi\Pi Д} = 0,58$. Результаты показывают, что при РСО накапливаются примерно в 4 раза большие, чем при ППД, значения деформации без разрушения поверхностного слоя, а степень исчерпания запаса пластичности при этом увеличивается лишь на 12%.

Участок контура	Степень деформации сдвига на участке Л і	$\frac{\Lambda_i}{\sum \Lambda_i}$	СИЗП на участке Ψ_i	$\frac{\Psi_i}{\sum \Psi_i}$
AC_1C_2	2,0	0,66	0,50	0,77
C_2D	0,99	0,33	0,12	0,18
DEF	0,01	0,01	0,03	0,05
Всего	3,0	-	0,65	-

Накопленные значения Λ и Ψ

Иными словами, вследствие применения больших натягов, РСО позволяет накапливать такие значения СДС, которые при ППД недостижимы по причине неизбежного разрушения поверхностного слоя детали. При этом степень исчерпания запаса пластичности (по сравнению с ППД) либо достигает тех же значений, либо увеличивается на 5 - 15%.

Установлено, что при обработке РСО имеется больший, чем при обычных схемах ППД, диапазон управления программой нагружения за счет регулирования в широких пределах натяга h_p , профильного радиуса ролика R_{np} и специфического параметра - зазора a_d (рис. 1.54).

Способ РСО также позволяет получать большую глубину распространения пластической деформации, однако характерным является то, что при этом **98%** СДС и СИЗП накапливается в поверхностном слое глубиной **0,3** – **0,5** *мм* (рис. 1.55). В то же время, градиенты степени деформации сдвига и СИЗП по глубине упрочненного слоя составили:

для РСО
$$\Gamma(\Lambda_{PCO}) = \frac{\Lambda}{h} = \frac{2.6}{3.5} = 0.74; \ \Gamma(\Psi_{PCO}) = \frac{\Psi}{h} = \frac{0.7}{3.5} = 0.2,$$

а для ППД
$$\Gamma(\Lambda_{\Pi\Pi \chi}) = \frac{\Lambda}{h} = \frac{0.715}{3.0} = 0.24; \ \Gamma(\Psi_{\Pi\Pi \chi}) = \frac{\Psi}{h} = \frac{0.58}{3.0} = 0.19.$$

Видно, что в отношении управления накоплением деформации и исчерпанием запаса пластичности по глубине поверхностного слоя РСО имеет большие, чем ППД, возможности.



Рис. 1.54. Зависимости накопленной степени деформации *Л* от показателя схемы напряженного состояния *П* (программы нагружения)



Рис. 1.55. Накопленные значения **Л** и **У**по глубине поверхностного слоя

1.2. Механика трансформации структурного и механического состояния поверхностного слоя на стадии циклического эксплуатационного нагружения

1.2.1. История нагружения до зарождения усталостной трещины

История нагружения до зарождения усталостной трещины в общем случае зависит от истории нагружения при механической обработке. В свою очередь, модель накопления повреждений при механической обработке представляет собой сумму дефектов, накопленных на каждом этапе и участке программы нагружения с учетом немонотонности.

большой C вероятностью что случае можно утверждать, В рационального построения упрочняющей механической технологии предшествующих обработки, накопленные на стадиях повреждения оцениваются величиной $\Psi < 1$. Эксплуатационное усталостное нагружение характеризуется определенным законом нагружения. В частности, в случае периодического симметричного нагружения, внешнее воздействие характеризуется параметрами: σ_{min} - минимальное напряжение цикла; σ_{max} максимальное напряжение цикла; σ_{a} - размах напряжений цикла; σ_{m} - среднее напряжение цикла; *f* - частота циклов.

Рабочие напряжения представляют собой векторную сумму напряжений от внешней нагрузки и остаточных напряжений. Очевидно, что сжимающие остаточные напряжения приводят к снижению негативного воздействия на процесс усталостного нагружения. На данной стадии будет происходить дальнейшее накопление повреждений до момента образования усталостной трещины, что характеризуется величиной $\Psi = 1$.

Известно, что для каждого конструкционного материала и структурного состояния этого материала существует предельное количество циклов, при котором зарождается усталостная трещина. При этом каждый этап циклического деформирования характеризуется определенным показателем схемы напряженного состояния, при котором происходит

накопление циклических повреждений. Очевидно, что существует некоторая поверхность, описывающая характер накопления повреждений при усталостном нагружении до момента зарождения усталостной трещины. По аналогии с поверхностью пластичности построим поверхность предельных усталостных циклов до момента зарождения усталостной трещины (рис. 1.56).



Рис. 1.56. Поверхность предельных усталостных циклов до момента зарождения усталостной трещины

Рассмотрим подробнее координатные плоскости и некоторые характерные точки и линии этой диаграммы. Диаграмма выполнена в следующих осях:

• ось Ψ - характеризует накопление дефектов в процессе усталостного нагружения начиная с некоторого стартового значения, накопленного при

механической обработке. Предельным является случай $\Psi = 0$, что соответствует исходному бездефектному материалу;

• ось *П* - характеризует изменение показателя схемы напряженного состояния в процессе усталостного нагружения;

• ось *N*_{*и.д} - характеризует изменение предельных циклов усталостного нагружения.</sub>*

Координатные плоскости выбраны таким образом, что позволяют проводить анализ истории нагружения и предельных состояний материала в процессе циклического нагружения до зарождения усталостной трещины с учетом истории нагружения при механической обработке.

На координатной плоскости " $\Pi - N_{u,o.}$ " представлен график изменения числа циклов до момента зарождения усталостной трещины в зависимости от показателя схемы напряженного состояния. На координатной плоскости " $\Psi - N_{u,o.}$ " представлен след анализируемой поверхности, характеризующий накопление дефектов при показателе схемы, соответствующем состоянию зарождения усталостной трещины (при напряжении, соответствующем пределу выносливости). На координатной плоскости " $\Pi - \Psi$ " графически показаны возможные состояния материала, характеризующие накопление дефектов в зависимости от показателя схемы напряженного состояния.

Рассмотрим более подробно след анализируемой поверхности на плоскость "*П* – *N*_{*u.d.*}".

В теории усталостного нагружения известна диаграмма усталостного разрушения, построенная в координатах "логарифм напряжений циклалогарифм долговечности" (рис. 1.57) [4-7].

Как видно из диаграммы, можно выделить 6 областей, продолжительность которых для разных материалов и условий нагружения может быть различной. Точка на вертикальной оси примерно соответствует пределу прочности при растяжении-сжатии. Область квазистатического разрушения 1 может составлять от десятков до тысяч циклов. Область

циклической ползучести 2 соответствует образованию квазистатического излома с шейкой. Продолжительность области 3 малоцикловой усталости составляет от 5*10² до 10⁴ циклов.



Рис. 1.57. Диаграмма усталостного разрушения для стали 45 в логарифмических координатах

Многоцикловая усталость представлена двумя областями - областью 5 до зарождения усталостной трещины и областью 6 - работы образца с трещиной вплоть до полного разрушения (область живучести). На кривой имеется два разрыва: в области 2-верхний разрыв и в области 4-нижний разрыв. В этих областях происходит трансформация видов разрушения, обусловленная сменой механизмов разрушения, а сами участки кривой могут и не стыковаться между собой.

Кривая усталостного разрушения показана для сталей, у которых обнаруживается физический предел выносливости, т.е. когда на ней есть горизонтальная область 6.

Механизмы накопления повреждений и разрушения в различных областях кривой усталостного разрушения существенно различные [8-9]. В

квазистатической области процесс разрушения определяется большими пластическими деформациями, развивающимися под действием напряжений, близких к пределу текучести. В металле возникают значительные смещениясдвиги, происходящие внутри или по границам зерен.

В области многоцикловой усталости действующие напряжения малы, поэтому не могут вызвать значительных пластических деформаций. Усталостное повреждение связано здесь с локальными микропластическими деформациями, причем осуществляемыми путем сдвига. Однако эти сдвиги являются чрезвычайно локализованными, что не позволяет обнаружить измеримые остаточные деформации. Далее протекает длительный процесс движения, слияния и накопления подвижных дефектов, что приводит к образованию плоскостях активного скольжения множественных В субмикротрещин, выходящих за пределы одного зерна. Когда в некотором сечении плотность таких микротрещин станет критической, возникает магистральная трещина. В дальнейшем ее развитие описывается диаграммой циклической трещиностойкости.

В области малоцикловой усталости повреждение носит промежуточный характер - между квазистатическим и чисто усталостным. При ЭТОМ усталостные механизмы становятся определяющими при напряжений, больших уменьшении a механизмы разрушения OT пластических деформаций действуют при увеличении напряжений. Характер изломов, будучи типично усталостным при напряжениях, близких к пределу выносливости, существенно изменяется по мере роста напряжений: он переходит в малоцикловый, квазистатический и - в предельном случае разрушения при однократной статической нагрузке - в статический.

Исходя из общих методологических предположений, свойственных феноменологии статического и феноменологии усталостного деформирования, можно говорить о непрерывности процесса накопления повреждений. История усталостного нагружения неотрывна от истории предшествующего деформирования, представляя собой процесс

продолжающегося исчерпания запаса пластичности. Логичным является предположение о том, что напряженное состояние при циклическом нагружении вплоть до образования усталостной трещины может быть охарактеризовано показателем схемы, идентичным по структуре и физической сущности показателю схемы при статическом деформировании. Речь может идти о том, что этот показатель также должен представлять собой отношение напряжений, создающих определенную гидростатику, и напряжений, осуществляющих микропластические сдвиги при циклическом нагружении.

По всей видимости, определение гидростатического напряжения и интенсивности касательных напряжений должно проводиться на основе определения суммарного (действующего) напряженного состояния. Тензор действующих напряжений должен представлять собой сумму тензоров остаточных и усталостных (циклических) напряжений. Отношение определенных инвариантов тензора действующих напряжений и составляет конструкцию показателя схемы напряженного состояния при циклическом деформировании.

Подобная конструкция позволяет оперировать на этапах статического и усталостного нагружения родственными категориями напряженного состояния. Аналитическая модель показателя схемы напряженного состояния на стадии циклической долговечности представлена в следующем разделе; здесь проведем анализ диаграмм с использованием этого показателя.

Если заменить на диаграмме усталостного разрушения ось $\sigma(\ln \sigma)$ на ось Π и развернуть эту диаграмму на 90⁰, то получим след поверхности предельных циклов на данную плоскость (рис. 1.56).

Рассмотрим след анализируемой поверхности на плоскость " $\Psi - N_{\mu,o.}$ ". Данная диаграмма показывает накопление повреждений в материале от некоторого значения до появления видимой трещины. Накопление повреждений происходит при неизменном циклическом напряжении, соответствующем пределу выносливости σ_{-1} .

На координатной плоскости "*П* – *Ψ*" можно выделить следующие характерные точки и линии:

• ось Π - при значении показателя $\Psi = 1$ характеризует состояние материала с уже имеющейся начальной трещиной. При этом данная трещина возникла вследствие накопления достаточного количества дефектов уже при механической обработке. Дальнейшее циклирование приводит к необходимости рассматривать закономерности усталостного разрушения по диаграмме циклической трещиностойкости. "Смягчение" или "ужесточение" схем нагружения показано на данной оси соответствующими стрелками. Это означает, что в точке 1 схема нагружения более "жесткая", поскольку разрушение происходит при количестве циклов $N_{u.d.} = 1$;

• Линия, перпендикулярная оси Π в точке 1 - соответствует простому нагружению в условиях одноосного растяжения или сжатия при количестве циклов $N_{u.o.} = 1$. Нагружение может производиться при стартовом значении $\Psi = \theta$ или, начиная с некоторого значения $\Psi \neq \theta$. Это состояние соответствует материалу с некоторой историей нагружения;

• Ось Ψ начинается с точки $\Psi = 0$ и заканчивается в точке начала системы координат, соответствующей $\Psi = 1$;

• Точки на линии, перпендикулярной оси Ψ в точке $\Psi = \theta$, соответствуют состоянию бездефектного материала, когда циклирования не происходит, но материал находится в нагруженном состоянии при некотором показателе схемы Π ;

• Ось *N_{и.д.}* позволяет проследить изменение количества циклов от нулевого значения (точка 1) до значения, соответствующего циклической долговечности (точка 3 соответствует началу зарождения усталостной трещины).

Принимаем, что поверхность предельных циклов не изменяется в процессе усталостного нагружения и характерна для данного структурного состояния материала. Проследим историю пластической деформации до
момента зарождения усталостной трещины в зависимости от истории процесса циклического нагружения (рис. 1.58).

Различные программы нагружения располагаются на поверхности предельных циклов, как бы растекаясь по ней. При этом, как было отмечено выше, независимо от истории деформирования на разных этапах видимая трещина будет возникать при $\Psi = 1$. Иными словами, появление видимой трещины возможно, если программа нагружения достигнет следа поверхности предельных циклов - диаграммы усталостного разрушения.

Траектории программ нагружения стартуют В точке A, располагающейся на поверхности предельных циклов. Для этой точки характерно наличие дефектов на уровне Ψ_{μ} , накопленных при механической обработке. История циклического деформирования всецело определяет положение траектории нагружения на поверхности предельных циклов. Иными словами, дальнейшее накопление дефектов зависит не только от истории предшествующего деформирования, но и характера нагружения при циклировании. Сочетание остаточных напряжений после механической обработки и нагрузочных напряжений дает некоторый показатель схемы напряженного состояния. Далее возможны варианты траектории нагружения, обозначенные цифрами 1,2 и 3.

Траектория 1 возможна при переменном значении показателя схемы, причем по ходу циклирования происходит "смягчение" этого показателя. Траектория смещается в область многоцикловой усталости, приводя к образованию видимой трещины при показателе схемы, свойственном выносливости материала. Траектория 2 свидетельствует об пределу "ужесточении" схемы напряженного состояния, что приводит к образованию видимой трещины в области малоцикловой усталости. Наконец, траектория 3 характерна для циклического нагружения образца с некоторой начальной поврежденностью при постоянном показателе напряженного схемы состояния.

Далее предположим, ЧТО поверхность предельных циклов видоизменяется В зависимости OT истории деформирования при механической обработке. Иными словами, каждый этап предшествующего положение деформирования сдвигает следов этой поверхности на соответствующих координатных плоскостях. Прежде чем рассмотреть историю циклического нагружения до зарождения усталостной трещины, подвергнем анализу поведение кривых,

являющихся следами поверхности предельных циклов на соответствующие плоскости. Предполагаем, что структурное состояние материала не изменялось на всех этапах деформирования.

Предполагаемое изменение характера зависимости " $\Psi - N_{u.d.}$ " представлено на рис. 1.59. Видно, что увеличение стартового (ранее накопленного) значения Ψ приводит к смещению этой зависимости относительно осей координат. Вначале с ростом Ψ происходит и рост количества предельных циклов до зарождения усталостной трещины, что является установленным фактом (кривая 2). Далее, начиная с некоторого значения Ψ , количество циклов до зарождения усталостной трещины уменьшается (кривая 3). В пределе с увеличением накопленного значения Ψ данная кривая стремится к началу системы координат (кривая 4).

Вид зависимости " $\Pi - N_{u.o.}$ " также меняется с ростом накопленного при механической обработке Ψ (рис. 1.60).

Первоначально с ростом исходной поврежденности происходит рост количества предельных циклов (кривая 2). Возрастающая поврежденность поверхностного слоя приводит к смещению кривой усталостного разрушения в область более жестких схем нагружения в процессе циклического нагружения. Связано это, в первую очередь, с изменением характера остаточного напряженного состояния. Ужесточение схем напряженного состояния приводит, в свою очередь, к уменьшению числа циклов до появления усталостной трещины, приводя в пределе к уменьшению размеров следа поверхности предельных циклов на данной координатной плоскости.

Таким образом, накопление повреждений на предшествующих этапах деформирования приводит к снижению пластичности и возможностей для дальнейшего деформирования. Рост Ψ приводит вначале к некоторому росту абсолютных размеров поверхности предельных циклов, а в дальнейшем, к уменьшению эти размеров. Подобная гипотеза может быть проиллюстрирована схемой (рис. 1.61).



Рис. 1.58. Траектории усталостного нагружения

Видно, что с ростом поврежденности от механической обработки поверхность предельных циклов уменьшается в размерах, показывая тем самым уменьшающийся запас пластичности для дальнейшего деформирования. В пределе при $\Psi \rightarrow 1$ поверхность "схлопывается", т.е. происходит коллапс этой поверхности. В этом случае схема дальнейшего деформирования тела с начальной видимой трещиной уже не может быть

объемной, т.к. по оси Ψ достигнут предел. Показатель схемы трансформируется в показатель схемы нагружения тела с начальной трещиной, а ось предельных циклов - в ось, характеризующую развитие этой трещины.



Рис. 1.59. Изменение характера зависимости *Ψ* от предельных циклов усталостного нагружения: 1,2,3,4 - кривые, характеризующие вид этой зависимости с увеличением исходного значения *Ψ*

Действительно, описание поведения тела с начальной трещиной производится В рамках механики линейной теории упругости В предположении, что доля пластической деформации мала и постоянна. Диаграмма дальнейшего нагружения также строится в осях "коэффициент интенсивности напряжения - скорость роста усталостной трещины". Можно констатировать, что предлагаемая концепция, в основе которой лежат представления о поверхностях пластичности, поверхностях нагружения и поверхностях предельных циклов соответствует современным неупругого представлениям механики пластического и циклического деформирования.

Таким образом, в основе представлений о механике ТН лежит концепция трансформации поверхностей пластичности и нагружения в зависимости от истории деформирования.



Рис. 1.60. Предполагаемое смещение кривой усталостного разрушения в зависимости от истории нагружения при механической обработке: 1 - кривая неупрочненного материала; 2,3,4 - кривые, соответствующие возрастающему значению накопленного ранее *Ф*



Рис. 1.61. Трансформация поверхности предельных циклов с ростом начальной поврежденности: 1,2,3,4 - поверхности с возрастающей начальной поврежденностью; 1 - поверхность с нулевой начальной поврежденностью

1.2.2. Оценка напряженного состояния поверхностного слоя с учетом истории нагружения

Как было отмечено выше, усталостное нагружение целесообразно разделить на 2 стадии:

• стадию циклической долговечности, т.е. стадию нагружения до появления видимой трещины;

• стадию циклической трещиностойкости, т.е. стадию работы образца с трещиной до полного его разрушения.

В основе построения моделей лежат предположения о том, что:

• На стадиях механической обработки накоплена пластическая деформация $\Lambda_{_{Mex}}$, произошло исчерпание запаса пластичности на величину $\Psi_{_{Mex}}$, в итоге возникли остаточные напряжения, описываемые тензором этих напряжений $(T\sigma)_{_{ocm}}$. В категориях механики деформирования вышеуказанные параметры отражают историю нагружения;

• На стадии циклической долговечности продолжается накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности;

• На стадии циклической долговечности в поверхностном слое действуют усталостные (циклические) напряжения от внешней нагрузки и остаточные напряжения. Вектор напряжений от циклической нагрузки зависит от вектора этой нагрузки, а вектор остаточных напряжений зависит от векторов действовавших на предшествующих стадиях нагрузках;

 Появление видимой трещины означает релаксацию или полное снятие остаточных напряжений, полное исчерпание запаса пластичности и начало стадии циклической трещиностойкости;

 На стадии циклической трещиностойкости действующие напряжения являются амплитудными и изменяются по мере продвижения трещины вглубь образца;

• Стадия циклической трещиностойкости описывается 3 этапами в соответствии с параметрами диаграммы циклической трещиностойкости;

 История нагружения на стадиях механической обработки оказывает существенное влияние на продолжительность каждой стадии усталостного нагружения;

• История нагружения на стадии циклической долговечности, в свою очередь, оказывает влияние на продолжительность стадии циклической трещиностойкости.

Описание дальнейшего накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности на стадии циклической долговечности возможно при

использовании ранее принятого понятийного аппарата. Для этого необходимо:

1. Найти аналог показателю схемы на стадии циклической долговечности и описать накопление деформаций в каждом цикле;

2. Описать соотношения между напряженным и деформированным состоянием на каждом этапе (цикле нагружения или его части);

3. Описать закономерности накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности;

4. Найти и описать аналог диаграммы предельной пластичности, по отношению к которой можно оценить исчерпание запаса пластичности в каждом цикле и в целом на стадии циклической долговечности.

Предлагается единый по структуре и физическому смыслу показатель схемы напряженного состояния для различных стадий и этапов нагружения: простого статического, механической обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД), усталостного нагружения [10-11]. В соответствии с механическими представлениями, показатель схемы представляет собой отношение среднего нормального напряжения σ к интенсивности касательных напряжений T, т.е.

$$\Pi = \frac{\sigma}{T} \,. \tag{1.6}$$

Полагаем, что векторы усталостных (циклических) и остаточных напряжений заданы в одной (декартовой) системе координат. На стадии циклической долговечности образец (балка) находится под действием поперечной силы (рис. 1.62).

Полагаем, что напряжения кручения не возникают, т.к. сила лежит в плоскости симметрии образца. В самом общем случае, в опасном сечении действуют [9]:

- касательные "срезывающие" напряжения τ';
- нормальные (осевые) напряжения σ_x .



При этом касательные напряжения $\tau' \sim P/d^2$, где *P* и *d* - сила и диаметр образца в рабочем сечении соответственно, а нормальные напряжения $\sigma_x \sim l/d$.

По мнению Ю.Н. Работнова, при достаточно большом соотношении длины к диаметру образца касательные напряжения уменьшаются и составляют сравнительно небольшую величину от нормальных. "Это связано с тем, что при увеличении длины стержня с сохранением его поперечного сечения касательные напряжения остаются неизменными, а нормальные возрастают пропорционально длине. Таким образом, всегда можно сделать отношение 1/d таким, чтобы наибольшие касательные напряжения составили сколь угодно малую долю от наибольших нормальных. В теории изгиба, как правило, основное внимание обращается именно на нормальные напряжения, касательные же во внимание не принимаются. Исключение составляют тонкостенные стержни, стержни из древесины, пластиков и других материалов".

Если продольная сила отсутствует и изгиб происходит в вертикальной плоскости, то нормальное напряжение будет равно:

$$\sigma_x = \frac{M}{W} = \frac{Pl}{\pi d^3 / 32},\tag{1.7}$$

где *М* - изгибающий момент; *W* - момент инерции рабочего сечения; *I* - расстояние от точки приложения силы до точки вероятного разрушения.

По мнению авторов [12-15], при изгибе тонкого стержня большой является только растягивающая (или сжимающая) компонента тензора внутренних напряжений. Деформация, в которой отлична от нуля только компонента тензора напряжений, действующих вдоль главной оси, есть не что иное, как деформация простого растяжения или сжатия.

Усталостные (циклические) напряжения в тензорном виде могут быть представлены как:

$$(T\sigma)_{ycm} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \theta & \theta \\ \theta & \theta & \theta \\ \theta & \theta & \theta \end{bmatrix}.$$
 (1.8)

Тензор усталостных напряжений определяется в опасном сечениисечении вероятного разрушения. Кроме того, учитывается знак этих напряжений, который дважды изменяется в каждом цикле усталостного нагружения.

При расчете остаточных напряжений предполагалось, что при нагружении на стадиях резания и ППД имело место плоское деформированное состояние, компонента σ_x направлена вдоль оси детали, а тензор остаточных напряжений может быть представлен как:

$$(T\sigma)_{ocm} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \theta \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \theta \\ \theta & \theta & \sigma_z \end{bmatrix},$$
 (1.9)

где σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} -соответственно нормальные и касательная компоненты остаточных напряжений.

По мнению авторов [12-15], результирующее напряженное состояние определяется суперпозицией остаточных напряжений и напряжений от нагружения внешними силами. При совпадении направлений векторов главных напряжений для обеих составляющих и при симметричном цикле напряжений от внешней нагрузки поверхностный слой изделия работает в условиях асимметрии цикла тем большей, чем больше остаточные напряжения. Среднее напряжение цикла при этом равно остаточному напряжению, а амплитуда равна напряжению от внешней нагрузки. В условиях циклического нагружения сжимающие остаточные напряжения повышают, а растягивающие - снижают усталостную прочность. При этом остаточные напряжения независимо от их знака релаксируют. Чем ближе значение результирующих напряжений к пределу текучести, тем с большей скоростью происходит полная релаксация остаточных напряжений. При действии циклических нагрузок основное значение приобретает не характер распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, а величина и знак напряжений на поверхности. Остаточное напряженное состояние зависит от пластичности материала, частоты нагружения и др. факторов.

И.А. Биргер полагает, что пластическая деформация от внешних нагрузок приводит к уменьшению или даже полному исчезновению первоначальных остаточных напряжений [16]. Однако пластическая деформация при неоднородном напряженном состоянии вызывает новые остаточные напряжения. В случаях, когда пластическая деформация, вызванная переменными напряжениями, превышает первоначальную остаточную деформацию, в детали может наблюдаться даже изменение знака остаточных напряжений.

Исходя из вышесказанного, тензор действующих (суммарных) напряжений может быть представлен в виде суммы остаточных и усталостных (циклических) напряжений:

$$(T\sigma)_{\partial} = (T\sigma)_{ocm} + (T\sigma)_{ycm} = \begin{bmatrix} (\sigma_x)_{ocm} + (\sigma_x)_{ycm} & \tau_{xy} & \theta \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \theta \\ \theta & \theta & \sigma_z \end{bmatrix},$$
(1.10)

где подстрочные индексы относятся соответственно к действующим, остаточным и усталостным напряжениям.

В целях упрощения записи введем замену:

$$(\boldsymbol{\sigma}_{x})_{ocm} + (\boldsymbol{\sigma}_{x})_{ycm} = (\boldsymbol{\sigma}_{x}). \tag{1.11}$$

Определим компоненты показателя схемы напряженного состояния на стадии циклической долговечности. Для этого из тензора действующих напряжений выделим необходимые инварианты [17]:

• Первый инвариант:

$$I_{I}(T\sigma)_{\delta} = (\sigma_{x})_{\delta} + \sigma_{y} + \sigma_{z}; \qquad (1.12)$$

• Второй инвариант:

$$I_{2}(T\sigma)_{\partial} = (\sigma_{x})_{\partial}\sigma_{y} + \sigma_{y}\sigma_{z} + \sigma_{z}(\sigma_{x})_{\partial} - (\tau_{xy})^{2}; \qquad (1.13)$$

• Третий инвариант:

$$I_{3}(T\sigma)_{\delta} = (\sigma_{x})_{\delta}\sigma_{y}\sigma_{z} - \sigma_{z}(\tau_{xy})^{2}. \qquad (1.14)$$

С целью определения главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ решалось кубическое уравнение, которое в категориях инвариантов выразится как:

$$x^{3} - I_{1}x^{2} + I_{2}x - I_{3} = \theta.$$
 (1.15)

Среднее нормальное напряжение в категориях главных действующих напряжений определяется по формуле:

$$\sigma_{\delta} = \frac{1}{3} I_1 (T\sigma)_{\delta} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$
(1.16)

Второй инвариант девиатора главных действующих напряжений (интенсивность касательных действующих напряжений):

$$T_{\delta} = +\sqrt{\left|I_{2}(D\sigma)_{\delta}\right|} = \frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{\left(\sigma_{1}-\sigma_{2}\right)^{2}+\left(\sigma_{2}-\sigma_{3}\right)^{2}+\left(\sigma_{3}-\sigma_{1}\right)^{2}}.$$
 (1.17)

В итоге, показатель схемы напряженного состояния на стадии циклической долговечности определится как:

$$\Pi_{\delta} = \frac{\sigma_{\delta}}{T_{\delta}}.$$
 (1.18)

В рамках предлагаемой модели накопление деформаций в поверхностном слое на стадии циклической долговечности происходит при определенном, меняющемся от цикла к циклу, а также в пределах каждого цикла, показателе схемы напряженного состояния. Это обусловлено, прежде всего, релаксацией остаточных напряжений и их полным исчезновением в момент образования видимой усталостной трещины; в этот момент времени в опасном сечении действуют только усталостные напряжения. Этому состоянию соответствует полное исчерпание запаса пластичности, т.е. $\Psi = 1$ и начало стадии циклической трещиностойкости.

Оценим величину показателя схемы, характерного для этого момента времени. Получим

$$(T\sigma)_{ocm} = 0;$$

$$\Pi_{o} = \frac{\sigma_{o}}{T_{o}} = \frac{\frac{1}{3}I_{I}(T\sigma)_{ycm}}{+\sqrt{|I_{2}(D\sigma)_{ycm}|}} = \frac{(\sigma_{x})_{ycm}}{\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_{x})_{ycm}^{2} + (\sigma_{x})_{ycm}^{2}]}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx \pm 0,577.$$
(1.19)

Полученные значения показателя схемы напряженного состояния от действующих напряжений на финише стадии циклической долговечности соответствует условиям одноосного растяжения и сжатия, т.е. $\sigma_{11} \neq 0, \ \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0, \ \Pi_{\delta} = \pm 0,577.$

В нулевой момент времени усталостные напряжения отсутствуют. Тогда на старте стадии циклической долговечности действуют только остаточные напряжения, и показатель схемы определяется через компоненты этих напряжений:

$$\Pi_{\delta} = \frac{\frac{I}{3}I_{I}(T\sigma)_{ocm}}{+\sqrt{|I_{2}(D\sigma)_{ocm}|}}.$$
(1.20)

Очевидно, что по аналогии со стадиями резания и ППД возможна оценка монотонности развития деформации и на стадии циклической долговечности, для чего проводится расчет показателя вида напряженного состояния (показателя Лоде).

Исходя из принятых предположений, в каждом цикле усталостного происходит многократная знака деформации, нагружения смена обусловленная релаксацией остаточных напряжений. Оценка немонотонности развития деформации позволяет проводить расчеты исчерпания запаса пластичности и на стадии циклической долговечности с учетом истории нагружения.

Всего усталостному нагружению подвергались 7 выборок, обработанных резанием и ППД до разных степеней деформации, а также одна выборка деталей без упрочнения (после отжига).

Рассмотрим напряженное состояние поверхностного слоя деталей, принадлежащих 1 выборке и подвергнутых усталостному нагружению.

Остаточное напряженное состояние (тензор остаточных напряжений) описывается совокупность эпюр, представленных на рис. 1.63. Параметры остаточных, усталостных и действующих напряжений определяются по глубине поверхностного слоя. При этом учитывается, что усталостные напряжения изменяются по глубине по линейному закону, а именно:

$$(\sigma_x)_v = \sigma_x - \theta_z y \sigma_x, \qquad (1.21)$$

где σ_x - усталостные напряжения на поверхности детали в опасном сечении; *y*- глубина (вертикальная координата), на которой рассматриваются напряжения.





В соответствии с принятой схемой усталостного нагружения происходит периодическое изменение амплитуды напряжений цикла по синусоидальному закону:

$$\sigma_a = (\sigma_a)_i \, \sin kt \,. \tag{1.22}$$

Для 1 выборки в каждом цикле усталостного нагружения амплитуда напряжений цикла принимает максимальное и минимальное значения, равные $\pm 280,7$ МПа. Иными словами, оценивается напряженное состояние в положительном и отрицательном полуциклах нагружения по глубине упрочненного поверхностного слоя. Обозначим максимальную амплитуду цикла как σ_a^+ , а минимальную как σ_a^- . Рассмотрим характер изменения напряженного состояния в процессе циклирования:

• На старте нагружения действующие напряжения представляют собой сумму тензоров амплитудных и остаточных напряжений;

• На финише нагружения остаточные напряжения релаксируют до нуля, действуют только напряжения от внешней нагрузки.

На рис. 1.64 показаны графики, характеризующие показатель схемы напряженного состояния по глубине упрочненного слоя. Анализ показывает, что напряженное состояние крайне неоднородно по глубине поверхностного слоя.

На старте нагружения на глубине h = 0,006 мм в каждом цикле показатель схемы изменяется в пределах $-0,458 \le \Pi \le -0,213$. По мере смещения точки в глубину поверхностного слоя происходит "смягчение" схемы напряженного состояния и при h = 0,274 мм показатель схемы в каждом цикле изменяется от $-0,909 \le \Pi \le -0,745$; в дальнейшем происходит плавное возрастание ("ужесточение") показателя схемы.

На финише нагружения в соответствии с принятой гипотезой скачкообразно релаксируют остаточные напряжения, а величина показателя схемы изменяется в пределах от $-0.577 \le \Pi \le +0.577$. Последнее говорит о

том, что на финише стадии циклической долговечности материал детали работает в условиях простого сжатия и растяжения.





Таким образом, можно выделить следующие особенности напряженного состояния поверхностного слоя в процессе циклического нагружения:

1. Эпюра действующих напряжений не является линейной и изменяется по сечению изделия в соответствии с тензором остаточного напряженного состояния, что приводит к сложному характеру изменения показателя напряженного состояния по глубине упрочненного поверхностного слоя детали.

2. Существует сечение детали, где показатель схемы принимает наиболее "жесткое" значение, в данном случае равное $-0,458 \le \Pi \le -0,213$; ордината этого сечения составляет h = 0,006 мм.

3. На глубине $3,0 \le h \le 4,0$ мм имеет место наибольший размах показателя схемы напряженного состояния.

4. Эпюры показателя схемы смещаются в область положительных значений по мере перемещения точки вглубь поверхностного слоя.



Рис. 1.65. Изменение среднего значения показателя схемы напряженного состояния в тонком поверхностном слое: 1,3,5,6 – номера усталостных выборок; А – линия, соединяющая первые точки с минимальным размахом показателя схемы; В – линия, соединяющая точки подповерхностного экстремума показателя схемы

По всей видимости, в поверхностном слое глубиной до h = 1,0 мм наиболее вероятно полное исчерпание запаса пластичности и появление "видимой" трещины.

Во-первых, именно в этом слое произошло наибольшее накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности в процессе предшествующей механической обработки.

Во-вторых, в этом слое показатель схемы дважды изменяет тенденцию: на поверхности при h = 0,006 *мм* в положительном полуцикле показатель схемы более "жесткий", затем в интервале $0,085 \le h \le 0,558$ -более "мягкий", и, наконец, при h > 0,558-снова более "жесткий", чем в отрицательном полуцикле нагружения.

В третьих, в этом слое существуют подслои с координатами h = 0,085 мм и h = 0,558 мм, в которых размах показателя схемы минимален. Это свидетельствует о монотонности процессов развития пластической деформации, при которых исчерпание запаса пластичности не сопровождается залечиванием дефектов.

В четвертых, в этом слое существует точка с подповерхностным минимумом показателя схемы (h = 0,274 мм). Наличие такого экстремума говорит о смене знака в тенденции показателя схемы и, соответственно, изменении условий исчерпания запаса пластичности.

Определим координаты точек, опасных с позиций полного исчерпания запаса пластичности в упрочненных ППД деталях, входящих в 1-7 выборки. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.9.

По мере увеличения накопленной деформации и СИЗП происходит смещение в глубину поверхностного слоя точек, характеризующих минимальный размах и точек подповерхностного экстремума показателя схемы, а сами значения показателя схемы в этих точках становятся более положительными (рис. 1.65). Начиная с 5 выборки линии, характеризующие показатель схемы в положительных и отрицательных полуциклах, не пересекаются и смены тенденции в изменении показателя схемы не происходит.

Результаты оценки показателя схемы напряженного состояния в 1-7

	Показатели схемы в опасных точках с ординатами, мм								
	на поверхности		в 1-ой точке с минимальным размахом		в точке		во 2-ой точке		
Ma					подповерхност		с		
JNO					ного		минимальным		
выоорки					экстремума		размахом		
	$\left \begin{array}{c} \Pi\left(\sigma_{a}^{+} ight) \ \Pi\left(\sigma_{a}^{-} ight) \end{array} ight $	һ, мм	$rac{\Pi(\sigma_a^+)}{\Pi(\sigma_a^-)}$	h, мм	$rac{\Pi(\sigma_a^+)}{\Pi(\sigma_a^-)}$	h, мм	$rac{\Pi(\sigma_a^+)}{\Pi(\sigma_a^-)}$	h, мм	
1	-0,213	0,006	-0,695	0,085	-0,909	0,274	-0,703	0,558	
	-0,458		-0,624		-0,745		-0,715		
2	-0,209	0,006	-0,696	0,085	-0,910	0,369	-0,701	0,558	
	-0,459		-0,624		-0,744		-0,715		
3	0,824	0,01	-0,480	0,221	-0,681	0,474	-0,605	0,601	
	0,090		-0,551		-0,660		-0,648		
4	0,792	0,01	-0,527	0,216	-0,703	0,463	-0,623	0,587	
	0,021		-0,569		-0,669		-0,658		
5	0,979	0,012	-0,557	0,376	-0,577	0,513			
	0,287		-0,594		-0,620			-	
6	1,036	0,013	-0,446	0,402	-0,486	0,548			
	0,464		-0,554		-0,584		-	-	
7	1,005	0,012	-0,506	06 75 0,388	-0,536	0,53			
	0,383		-0,575		-0,603			-	

выборках

Численное моделирование накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности в процессе усталостного нагружения, а также фрактографические исследования показали, что наиболее вероятно разрушение металла в точках подповерхностного экстремума (таблица 1.10). Это связано с тем, что, во-первых, значения наследственных степени деформации сдвига и СИЗП в этих точках отличаются не более чем на 10-25% от соответствующих значений на поверхности образцов, во-вторых, наличие такого экстремума говорит о наибольшей скорости изменения показателя схемы и, соответственно, исчерпания запаса пластичности и, в третьих, в этих точках размах показателя схемы незначителен и уменьшается по мере увеличения наследственной деформации.

Показатели схемы напряженного состояния и ординаты точек вероятного

№ выборки	$rac{\Pi\left(\!\sigma_{a}^{+} ight)}{\Pi\left(\!\sigma_{a}^{-} ight)}$	һ, мм	$\overline{\Pi}$
1	-0,909 -0,745	0,274	-0,827
2	-0,910 -0,744	0,369	-0,82
3	-0,681 -0,660	0,474	-0,67
4	-0,703 -0,669	0,463	-0,686
5	-0,577 -0,620	0,513	-0,599
6	-0,486 -0,584	0,548	-0,535
7	-0,536	0,53	-0,57

разрушения

Отметим, что для неупрочненных (отожженных) образцов, составляющих нулевую выборку, остаточные напряжения отсутствуют, действуют только циклические напряжения, показатель схемы изменяется в пределах $-0.577 \le \Pi \le 0.577$, а точка вероятного разрушения находится на поверхности.

Очевидно, что неоднородность напряженного состояния, обусловленная действием остаточных напряжений, приведет к крайне сложному закону накопления деформаций и исчерпания остаточного запаса пластичности.

Для полного понимания процессов, происходящих в поверхностном слое при усталостном нагружении образцов, требуется детализация описания, учитывающего динамику показателя схемы в зависимости от релаксации тензора остаточных напряжений в точке вероятного разрушения.

1.2.3. Релаксация остаточных напряжений и динамика показателя схемы напряженного состояния с учетом истории нагружения

При выполнении последующих расчетов приняли, что релаксация остаточных напряжений и, соответственно, изменение показателя схемы происходит в течение всего времени усталостного нагружения. Обратимся к имеющимся в этой области экспериментальным данным [3]. Установлено, что циклическое нагружение ускоряет возможные процессы релаксации напряжений в металлах и сплавах. Как отмечается, циклическое нагружение (изгиб вращением) при напряжении, с не превышающем предела выносливости, обеспечивает релаксацию технологических макронапряжений в образцах из хромомолибденовой стали после упрочнения дробью (рис. 1.66).



Рис. 1.66. Релаксация остаточных напряжений по мере увеличения числа циклов усталостного нагружения: 1 - $\sigma_a = 70 \kappa c / mm^2$; 2 - $\sigma_a = 62 \kappa c / mm^2$;

3 -
$$\sigma_a = 53\kappa^2 / MM^2$$
; 4 - $\sigma_a = 48\kappa^2 / MM^2$

В рамках рассматриваемого подхода релаксация остаточных напряжений под воздействием циклических нагрузок описывалась следующим законом:

$$\sigma = \sigma_{\theta} + \frac{a}{\ln(bN^c)}, \qquad (1.23)$$

где σ_{θ} - начальное (стартовое) значение компоненты остаточных напряжений в опасной точке; *N* - текущее значение количества циклов; *a,b,c* - коэффициенты.

Функция (1.23) получена путем статистической обработки распределений остаточных напряжений в зависимости от количества циклов и соответствует характеру релаксации остаточных напряжений, установленному экспериментально [3]. Выразив коэффициент *a* через текущее значение остаточных напряжений, получили:

$$\sigma = \sigma_{\theta} + \frac{\sigma}{\ln(bN^{c})}; \ \sigma\left(1 - \frac{1}{\ln(bN^{c})}\right) = \sigma_{\theta}; \ \sigma = \sigma_{\theta} \frac{\ln(bN^{c})}{\ln(bN^{c}) - 1}.$$

Известно, что $ln(bN^{c}) = lnb + c lnN$. Тогда:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{lnb + c ln N}{lnb + c ln N - 1}.$$
 (1.24)

В целях сохранения закономерностей релаксации остаточных напряжений значения входящих в формулу (1.24) компонент были пронормированы относительно исходных значений напряжений и циклов в точке вероятного разрушения, т.е.

$$[\sigma] = \frac{\sigma}{\sigma_{\theta}}; \ [N] = \frac{N}{N_{u,\theta}}, \tag{1.25}$$

где $[\sigma]$, [N] - нормированные значения напряжений и циклов; σ , N - текущие значения напряжений и циклов; σ_{θ} , $N_{u,\theta}$ - исходное значение напряжений и число циклов до появления видимой трещины (циклическая долговечность).

В категориях нормированных переменных получили численную модель релаксации остаточных напряжений:

$$[\sigma] = \sigma_{\theta} \frac{\ln \theta, \theta 1 + \theta, 32 \ln[N]}{\ln \theta, \theta 1 + \theta, 32 \ln[N] - 1}.$$
(1.26)

Статистический анализ позволил установить средние и среднеквадратические значения для коэффициентов, которые составили: $\bar{b} = 0,01; \ \bar{c} = 0,32; \ \sigma_b = 0,000742; \ \sigma_c = 0,006149$.

Исходя из нормированных значений, был проведен расчет релаксации компонент остаточных напряжений для всех 7 усталостных выборок. При этом предполагали, что:

 уменьшение численных значений компонент остаточных напряжений происходит равномерно и пропорционально числу циклов в соответствии с выбранным законом релаксации;

• отсутствует дрейф точки, опасной для зарождения видимой трещины.

На рис. 1.67 приведены характерные эпюры релаксации компонент остаточных напряжений в точке вероятного разрушения для 1 выборки, а на рис. 1.68 - зависимости показателя схемы напряженного состояния от числа циклов в точке вероятного разрушения для 1 выборки. Видно, что в начальный период показатель схемы отрицателен, а размах его относительно среднего значения сравнительно незначителен. При *N* ≈ 118500 циклов размах показателя схемы близок к нулю. При N > 118500 происходит существенное смещение показателя схемы в область более "жестких" схем в положительных полуциклах нагружения, незначительное И В отрицательных полуциклах нагружения; в то же время увеличивается размах этого показателя относительно среднего значения.

Полная релаксация остаточных напряжений и образование видимой трещины наступают при *−0,577 ≤ п ≤ +0,577*, что соответствует схемам простого одноосного сжатия и растяжения соответственно.

Подобные закономерности обнаружены для всех исследуемых серий опытов. На рис. 1.69 представлены зависимости средних значений показателя схемы от числа циклов на стадии циклической долговечности. Можно утверждать, что увеличение числа циклов в итоге приводит к более "жесткой" схеме напряженного состояния и увеличению размаха показателя схемы в каждом цикле нагружения. Кроме того, в 5-7 выборках

обнаруживается более резкая тенденция в изменении показателя схемы при *N* < *500000* циклов нагружения.



Рис. 1.67. Эпюры релаксации компонент остаточных напряжений (кгс/мм² в опасной точке для 1 выборки в зависимости от числа циклов нагружения)



Рис. 1.68. Зависимости показателя схемы напряженного состояния от числа циклов в опасной точке для 1 выборки



Рис. 1.69. Зависимости средних значений показателя схемы от числа циклов на стадии циклической долговечности (цифры соответствуют номерам выборок)

Представление о динамике показателей схемы напряженного состояния на стадии циклической долговечности будет неполным, если отсутствует информация о трансформации напряженного состояния в пределах одного цикла, причем в различные временные периоды.

Обратимся к анализу напряженного состояния в одном цикле усталостного нагружения.

С целью перехода к усредненным параметрам напряженного состояния в цикле (а в дальнейшем, и степени деформации сдвига, степени исчерпания запаса пластичности) и упрощения описания технологического наследования следует оценить правомерность такого усреднения. Рассмотрим подробнее механику точки вероятного разрушения в течение одного цикла. Процесс напряжений симметричный, периодический, шикл частота оборотов n = 3000 об / мин усталостной шпинделя установки составляет или $n = 50 \ o \delta / c$. Время одного оборота (цикла) составляет $t = \frac{1}{50} = 0.02 \ c$.

Построим циклограмму изменения амплитуды напряжений в процессе усталостного нагружения (рис. 1.70).

Учитывая, что амплитуда напряжений цикла σ_a изменяется по синусоидальному закону, проводилось моделирование изменения показателя схемы в соответствии с формулой:

$$\Pi = \Pi_i \, \sin kt \,. \tag{1.27}$$

При этом предполагалось, что в пределах одного (каждого) цикла происходит частичная релаксация остаточных напряжений.

Рассмотрим изменение показателя схемы напряженного состояния при нагружении в различных циклах применительно к выборке №1 (рис. 1.71). Видно, что показатель схемы в течение каждого из выбранных циклов усталостного нагружения изменяется в широких пределах. Также видно, что, несмотря на симметричный цикл напряжений нагрузки вследствие влияния остаточных напряжений, изменение показателя схемы в цикле имеет асимметричный характер.

По аналогии с ГОСТ 23207-78 введем понятие коэффициент асимметрии цикла показателя схемы напряженного состояния:

$$\boldsymbol{R}_{\Pi} = \frac{\boldsymbol{\Pi}_{\min}}{\boldsymbol{\Pi}_{\max}},\tag{1.28}$$

где Π_{min} и Π_{max} - соответственно минимальные и максимальные значения показателя схемы в пределах одного цикла. Рассмотрим основные параметры цикла показателя схемы в терминах и категориях усталостного нагружения.

В начальный момент времени при отсутствии внешней нагрузки $(\sigma_a = \theta)$ в детали действуют только остаточные напряжения и условно можно считать, что показатель схемы напряженного состояния постоянен и составляет $\Pi = -\theta,810$.



Рис. 1.70. Циклограмма усталостного нагружения для 1 выборки (МПа)



Рис. 1.71. Изменение показателя схемы напряженного состояния в пределах одного цикла; цифрами показан номер цикла усталостного

нагружения



Рис. 1.72. Зависимость коэффициента асимметрии цикла показателя схемы от числа циклов усталостного нагружения для 1 выборки



Рис. 1.73. Зависимость размаха показателя схемы от числа циклов для 1

выборки

Первый цикл нагружения характеризуется следующими параметрами: цикл асимметричный знакопостоянный; амплитуда показателя схемы $\Pi_a = 0,09$; размах показателя схемы $2\Pi_a = 0,18$; средний показатель схемы $\Pi_m = -0,830$; минимальное и максимальное значения $\Pi_{min} = -0,74$ и $\Pi_{max} = -0,92$; коэффициент асимметрии цикла показателя схемы $R_{\Pi} = 0,804$.

До $N \approx 800000$ цикл показателя схемы асимметричен и знакопостоянен. В этот же период нагружения происходит увеличение амплитуд, размаха, среднего значения, причем, в основном, за счет значений показателя схемы в полуциклах нагружения, в которых действуют положительные усталостные напряжения. Этому периоду нагружения свойственны и наиболее сложные формы циклов показателя схемы напряженного состояния.

При *N* > 800000 вплоть до окончания стадии циклической долговечности форма цикла наиболее сложная, показатель схемы принимает положительные и отрицательные значения.

По мере увеличения числа нагрузочных циклов и релаксации остаточных напряжений возрастает асимметрия показателя схемы в цикле (рис. 1.72), Коэффициент асимметрии уменьшает свое значение от $R_{\pi} = 1,24$ при N = 1 до $R_{\pi} = -12,76$ при $N \approx 800000$; затем следует увеличение до $R_{\pi} = -1,0$ при числе циклов N = 2050000, соответствующих окончанию стадии циклической долговечности и появлению видимой трещины.

При достижении уровня циклической долговечности размах показателя схемы в цикле наибольший (рис. 1.73). При этом значения показателя схемы соответствуют значениям, свойственным простому растяжению и сжатию, т.е. $-0.577 \le \Pi \le +0.577$.

Таким образом, в зависимости от количества циклов нагружения показатель схемы от 2-х до 5 раз в цикле меняет свое значение, что соответствует такому же числу монотонных этапов нагружения. Графики на рис. 1.72 - 1.73 отражают тенденции изменения показателя схемы в зависимости от истории нагружения.

Анализ показал, что вышеприведенные параметры цикла показателя схемы (Π_a , $2\Pi_a$, Π_m , Π_{min} , Π_{max} , R_{Π}) зависят от истории нагружения, с учетом которой формируется поверхностный слой детали. Усталостное нагружение формирует новое напряженное состояние поверхностного слоя, которое трансформируется вплоть до окончания стадии циклической долговечности.

Можно также констатировать, что напряженное состояние изменяется не только от цикла к циклу, но и в пределах одного цикла. Все это является следствием достаточно сложной истории нагружения, выраженной тензором остаточных напряжений.

2. РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГРАММ НАГРУЖЕНИЯ ИМЕЮЩИХ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО УЧАСТКОВ КВАЗИМОНОТОННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

2.1. Трансформация программ нагружения по стадиям жизненного цикла с учетом истории нагружения

Состояние очага деформации определяет формирование программ нагружения и наследуемость параметров поверхностного слоя. Поэтому важным является рассмотрение вопросов формирования и трансформации очагов деформации с учетом истории нагружения.

Рассмотрим этапы внедрения (нестационарный процесс) и обработки (стационарный процесс) резцом и деформирующим инструментом. Отдельные стадии этого процесса, на наш взгляд, выглядят следующим образом

На начальном нестационарном этапе индентор внедряется на глубину h_{a} (выглаживание) или t_{n} (резание) (рис. 2.1). По мере перемещения индентора в направлении скорости впереди него растет пластическая волна; положения границы очага деформации отмечены цифрами 1, 2, 3, 4. Подобное не раз наблюдали многие исследователи при резании и ППД, в том числе и автор настоящего исследования. Накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности происходит в ОД, передняя внеконтактная является свободной. При поверхность которого $h_{0} < 0,05...0,1$ мм В определенный момент наступает стабилизация процесса и образование свойственного ППД. стационарного ОД, Применительно к резанию собственно резания не происходит при припусках, сопоставимых с подачами; резец выглаживает поверхность без возникновения стружки.

Стационарный очаг деформации, как было описано выше, характеризуется волной впереди инструмента и упругопластическим

восстановлением за ним. Угол вдавливания для стационарного очага деформации при ППД не превышает $\theta < (3\theta - 32)^{\circ}$.



Рис. 2.1. Схема процесса внедрения индентора в заготовку и возникновения стационарного очага деформации



Рис. 2.2. Нестационарный процесс взаимодействия индентора с заготовкой: 0-6 - линии тока

При $h_{a} \approx 0,05...0,1$ мм размеры пластической волны и кривизна передней внеконтактной поверхности продолжают расти, величина натяга становится сопоставимой с припуском на механическую обработку при резании (рис. 2.2). Вдоль контура очага деформации (линия тока 0) происходит интенсивное накопление деформаций. В определенный момент времени в передней внеконтактной зоне накопленная степень деформации сдвига Λ при данном показателе схемы Π превысит допустимые для данного материала значения. Это является свидетельством того, что программа нагружения для этой линии тока достигла предельной, описываемой диаграммой пластичности, а степень исчерпания запаса $\Psi = 1$. пластичности достиг предельного значения Ha поверхности появляются следы разрушения металла, элементы отслоившегося металла попадают под инструмент и остаются на обработанной поверхности в виде чешуек (микростружек). Угол вдавливания постепенно достигает ППД значения; описываемому нестационарному критического ДЛЯ состоянию очага деформации соответствует $\theta \approx (30 - 32)^{\circ}$, что приводит к началу образования микростружки. В этом случае контур ОД, описываемый линией тока 0, является критическим для данных условий нагружения, а процесс может быть назван переходным.

Увеличение натяга свыше $h_o > 0,1$ мм и продолжение нагружения очага деформации приводит к тому, что некоторая часть деформированного поверхностного слоя начинает смещаться вдоль передней поверхности инструмента. На рис. 2.3 совмещены контуры очагов деформации и смещаемого объема металла: *ABCDEFG* – контур стационарного очага деформации при ППД; *K'C''DEFG'* – контур нестационарного очага деформации, в котором начинается смещение металла вдоль передней поверхности инструмента; *K''L''M''C''DEFG''* – контур стационарного очага деформации при резании. По всей видимости, в стационарном очаге деформации при резании положение точек *E* и *F* на задней внеконтактной

поверхности также изменяется, однако на рис. 2.3 для простоты они совмещены с соответствующими точками ОД при ППД.

Критическая линия тока, вдоль которой накапливаются предельные значения степени деформации сдвига, под действием смещаемого объема металла, перемещается вглубь поверхностного слоя: АВС – контур внеконтактной поверхности при ППД; А'В'С' - некоторое промежуточное положение критической линии тока; А"В"С" – положение критической линии тока в стационарном очаге деформации при резании. Смещение металла приводит к возрастанию гидростатического давления, уменьшению вертикальных и горизонтальных размеров очага деформации ниже критической линии тока с одновременным увеличением ее кривизны. Смещение металла вдоль контура передней поверхности и, в дальнейшем, в стружку приводит к стабилизации процесса и возникновению стационарного очага деформации, свойственного резанию. Для стационарного ОД при резании в зависимости от программы нагружения и пластических свойств металла угол вдавливания составляет $\theta \geq 40^{\circ}$.

С возникновением ОД стационарного изменяется программа обусловлено воздействием нагружения, что стружки и изменением напряженно-деформированного состояния. Программа нагружения при стационарном резании стартует с "мягких" (отрицательных) значений показателя схемы напряженного состояния. По мере смещения материальной точки вдоль критической линии тока, накопления деформации и исчерпания запаса пластичности схема "ужесточается", что приводит к созданию условий для разделения потоков металла – в стружку и под инструмент.



Рис. 2.3. Смещение поверхностного слоя металла в стружку и возникновение стационарного очага деформации при резании

Таким образом, при механической обработке резанием и ППД в зависимости от режима нагружения возникают подобные очаги деформации. При определенных условиях ОД при ППД может быть трансформирован в ОД при резании и наоборот. Вследствие этого, подобием обладают и программы нагружения вдоль линий тока в очагах деформации.

Вышеприведенный анализ позволил сформировать следующие представления о трансформации программ нагружения на стадиях резания и ППД.

1. Нагружение на стадии резания приводит к возникновению очага деформации, накоплению деформаций (упрочнению) Λ_{pes} , частичному исчерпанию запаса пластичности Ψ_{pes} , возникновению тензора остаточных напряжений $[(T\sigma)_{ocm}]_{pes}$ и формированию поверхностного слоя с определенной микрогеометрией. Порядок расчетов определен вышеприведенными онтологическими моделями и моделями, описывающими ПН и исчерпание запаса пластичности.

2. Λ_{pes} , Ψ_{pes} , $[(T\sigma)_{ocm}]_{pes}$ и микрогеометрия поверхности являются наследуемыми и влияют на процесс нагружения на стадии ППД. Микрогеометрия-шероховатость и волнистость поверхности,—определяются не только условиями на контакте инструмента с деталью, но и программой нагружения на стадии резания.

3. Нагружение на стадии ППД приводит к формированию очага деформации, параметры которого зависят от наследуемых параметров поверхностного слоя.

4. Технологическое наследование (ТН) приводит к появлению наследуемого (видоизмененного, трансформированного) очага деформации в сравнении с ОД, сформированном в неупрочненном поверхностном слое.

5. Наследуемые параметры поверхностного слоя определяют геометрию ОД, начальные и граничные условия механики и, в целом, напряженнодеформированное состояние очага деформации на стадии ППД.

6. НДС очага деформации, сформированное под влиянием наследуемых факторов, определяет характер накопления свойств, в том числе, программу нагружения на стадии ППД.

7. Программа нагружения на стадии ППД стартует с накопленной (наследуемой) деформации Λ_{pes} , а исчерпание запаса пластичности продолжается с уровня Λ_{pes} , полностью снимаются остаточные напряжения $[(T\sigma)_{ocm}]_{pes}$, а новый тензор остаточных напряжений формируется с учетом наследуемых и накопленных свойств.

8. Роль истории нагружения для стадии ППД заключается в наследственном влиянии на конфигурацию программы нагружения, скорость накопления деформаций и исчерпание запаса пластичности.

9. История нагружения для стадии ППД описывается в категориях программ нагружения по этапам квазимонотонной деформации на стадии резания.
10. Состояние поверхностного слоя после стадии ППД определяется накопленными (наследуемыми) свойствами - накопленными деформациями (упрочнением) Λ_{nnd} , степенью исчерпания запаса пластичности Ψ_{nnd} , тензором остаточных напряжений $[(T\sigma)_{ocm}]_{nnd}$; формирование микрогеометрии поверхности обусловливается наследуемым влиянием ПН на стадиях резания и ППД.

11. ТН в категориях механики деформирования – это закономерности изменения (трансформации) ПН на стадии ППД в зависимости от ПН на стадии резания.

Приведем основные закономерности изменения программ нагружения в зависимости от истории нагружения.

Предположим, что путь нагружения состоит из трех стадий – резания, $\Pi\Pi \square_1$ и $\Pi\Pi \square_2$, причем $\Pi\Pi \square_2$ осуществляется с теми же режимами, что и $\Pi\Pi \square_1$. Каждая из стадий состоит из трех этапов квазимонотонной деформации, на границах которых происходит смена знака деформации и частичное залечивание дефектов.

Исходный материал не упрочнен, его свойства описываются кривой течения и диаграммой пластичности, тензор остаточных напряжений равен нулю, степень исчерпания запаса пластичности также равна нулю. Исходное состояние поверхностного слоя (*СПС*,) описывается как:

$$\begin{cases} \sigma_{i} = \sigma_{s} + a \exp(b\varepsilon_{i}); \\ \Lambda_{p} = \chi \exp(\lambda\Pi); \\ [(T\sigma)_{ocm}]_{\theta} = \theta; \\ \Psi_{\theta} = \theta. \end{cases}$$
(2.1)

Нагружение на стадии резания приводит к появлению очага деформации, который зависит от исходного состояния и режимов резания. В свою очередь, состояние очага деформации определяет вид программы нагружения, а вид программы нагружения определяет новое состояние поверхностного слоя после обработки резанием:

$$\begin{cases} (OD)_{pes} = f_1 (C\Pi C_{\theta}, peжим peзahus); \\ (\Pi H)_{pes} = f_2 ((OD)_{pes}); \\ (C\Pi C)_{pes} = f_3 ((\Pi H)_{pes}) \end{cases}$$
(2.2)

В свою очередь, состояние поверхностного слоя после обработки резанием определяется системой наследственных уравнений, а кривая течения и диаграмма пластичности считаются неизменными:

$$\begin{cases}
\Lambda_{pes} = f_4 ((\Pi H)_{pes}) = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3; \\
\Psi_{pes} = f_5 ((\Pi H)_{pes}); \\
[(T\sigma)_{ocm}]_{pes} = f_6 ((\Pi H)_{pes}); \\
(R_a)_{pes} = f_7 ((\Pi H)_{pes}).
\end{cases}$$
(2.3)

Программа нагружения на стадии резания стартует в области "мягких" значений показателя схемы, постепенно смещаясь в область положительных значений. На каждом из трех квазимонотонных участков происходит накопление деформации $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ при размахе показателя схемы ($\Delta\Pi$ *резание*) и исчерпание запаса пластичности. На границе каждого участка при смене знака деформации происходит частичное залечивание дефектов.

В рамках предлагаемого подхода оценка роли истории нагружения при переходе на следующую стадию производится путем оценки трансформации программ нагружения под воздействием наследственной информации.

С этих позиций программа нагружения стадии *ППД*, формируется под влиянием наследуемых параметров состояния поверхностного слоя после обработки резанием, определяя, в свою очередь, состояние после обработки на стадии *ППД*:

$$\begin{cases} (OD)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}} = f_{s} ((C\Pi C)_{pes}, pe \mathcal{H} UM \Pi\Pi\mathcal{A}_{1}); \\ (\Pi H)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}} = f_{s} ((OD)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}}); \\ (C\Pi C)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}} = f_{10} ((\Pi H)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}}) \end{cases}$$
(2.4)

Аналогично, состояние поверхностного слоя после обработки *ППД*₁ определяется системой наследственных уравнений, а кривая течения и диаграмма пластичности также считаются неизменными:

$$\begin{cases} \Lambda_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}} = f_{11} ((\Pi H)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}}) = \Lambda_{pes} + \Lambda_{4} + \Lambda_{5} + \Lambda_{6}; \\ \Psi_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}} = f_{12} ((\Pi H)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}}); \\ [(T\sigma)_{ocm}]_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}} = f_{13} ((\Pi H)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}}); \\ (R_{a})_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}} = f_{14} ((\Pi H)_{\Pi\Pi\mathcal{A}_{1}}). \end{cases}$$

$$(2.5)$$

Программа нагружения на стадии $\Pi\Pi A_1$ является традиционной, расположенной в области отрицательных значений показателя схемы напряженного состояния, и описываемой совокупностью экспоненциальных моделей. Накопление деформации на квазимонотонных этапах Λ_4 , Λ_5 , Λ_6 происходит при размахе показателя схемы ($\Delta\Pi \Pi\Pi A_1$). Исчерпание запаса пластичности и частичное залечивание дефектов на границе каждого этапа также подвержено влиянию наследственной информации.

Можно построить аналогичную цепь рассуждений и для стадии $\Pi\Pi A_2$, предположив, что накопленные деформации достигли предельной для данного показателя схемы величины Λ_p , что означает полное исчерпание запаса пластичности материалом поверхностного слоя и значение показателя $\Psi = 1$.

Выше было принято, что режимы нагружения на стадиях $\Pi\Pi A_1$ и $\Pi\Pi A_2$ идентичны, тем не менее, вид и расположение программы нагружения $(\Pi H)_{\Pi\Pi A_2}$ в выбранной системе координат отличаются от программы нагружения $(\Pi H)_{\Pi\Pi A_1}$. Назовем эти особенности, имеющие наследственный характер:

1. Под влиянием накопленной деформации и истории нагружения программа нагружения $(\Pi H)_{\Pi\Pi A_2}$ стартует с более "жестких" значений показателя схемы. Иными словами, стартовое значение программы $(\Pi H)_{\Pi\Pi A_2}$ все более смещается в положительном направлении оси абсцисс.

2. Программа нагружения (*ПН*)_{ппд₂} "сжимается" вдоль осей координат; размах (*ΔП ППД*₂) уменьшается, уменьшается и накопленное на этой стадии значение степени деформации сдвига.

3. Изменяется характер накопления деформаций на стадии $\Pi\Pi \Lambda_2$, что выражается в уменьшении скорости этого накопления.

На наш взгляд, эти особенности характерны для всех рассматриваемых стадий, включая стадию циклического нагружения. Общим для этих стадий является принятие определяющей роли программ нагружения, формирующихся под воздействием истории нагружения.

Ранее было принято, что накопление деформаций на каждом квазимонотонном этапе описывается экспоненциальными моделями. Общим видом этого описания будет:

$$\Lambda_{i} = \Lambda_{k} + \frac{1}{\sigma_{\Pi} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Pi_{i} - \Pi_{i})^{2}}{2\sigma_{\Pi}^{2}}}.$$
 (2.6)

При этом наследственный параметр σ_{π} характеризует среднее квадратическое значение показателя схемы на данном этапе и, следовательно, зависит от истории нагружения, в частности, от ранее накопленной деформации (стартового значения) Λ_k .

Стартовое и финишное значения показателя схемы на данном этапе характеризуют размах $\Delta \Pi$ и также зависят от истории нагружения, т.е. от характера изменения программ нагружения на предшествующих этапах.

Исходя из вышеприведенного анализа, численные абсолютные значения этих величин по мере накопления деформаций будут уменьшаться.

Общее описание проявления наследственности при формировании программы нагружения *i – го* этапа при наличии *n* предшествующих этапов можно представить в виде:

$$(\Pi H)_{i} = f_{i} (\Pi H_{i-1} (\Pi H_{i-2} (\Pi H_{i-3} ... (\Pi H_{i-n})))).$$
(2.7)

Таким образом, программа нагружения на данном квазимонотонном этапе определяется не только характером воздействия и накопления деформации в данный момент времени, но всей историей изменения функции степени деформации сдвига от показателя схемы напряженного состояния.

Можно утверждать, что (*ПН*)_{*i*} есть функционал от истории нагружения, описываемой в категориях программ нагружения, т.е.

$$\left(\Pi H\right)_{i} = \mathop{F}\limits_{i-n}^{i-1} \left(\Pi H\right). \tag{2.8}$$

2.2. Аналитическая модель программы нагружения и наследственные закономерности исчерпания запаса пластичности на стадии поверхностного пластического деформирования

Как было отмечено выше, очаг деформации (ОД) представляет собой объем материала, находящийся в состоянии пластического течения в момент воздействия индентора (инструмента) на поверхностный слой изделия (рис. 2.4). Очаг деформации представлен в категориях ряда геометрических вертикальных и горизонтальных параметров.



Рис. 2.4. Схема очага деформации при обработке ППД

При нагружении поверхностного слоя пластическая деформация распространяется на глубину *h*, материальные частицы перемещаются в ОД

вдоль линий тока, в результате чего формируется поверхностный слой с неравномерными по глубине степенью деформации сдвига, показателем исчерпания запаса пластичности и тензором остаточных напряжений.

Оценка накопления свойств в очаге деформации производится в следующей последовательности.

1. Проводится описание ОД в категориях элементов режима обработки:

$$\begin{cases} h_{\delta}, h_{e}, h_{p}, \Delta = f(P, S, n, R_{np}, HV, ...); \\ l, d, d_{1}, l_{1}, L = f(P, S, n, R_{np}, HV, ...), \end{cases}$$
(2.9)

где $h_{\delta}, h_{s}, h_{p}, \Delta$ и l, d, d_{1}, l_{1}, L - геометрические высотные и осевые параметры очага деформации; P, S, n, R_{np}, HV - совокупность технологических факторов (сила, подача, частота, профильный радиус, твердость по Виккерсу и др.).

2. Выполняется описание типа "ОД - ОД" с целью уточнения координат характерных зон и точек очага деформации и "ОД - параметры качества" с учетом технологического наследования в зависимости от наследуемых свойств:

$$\begin{cases} l = f(h_{\delta}, h_{\epsilon}, h_{p}, d, ...); \\ d = f(h_{\delta}, h_{\epsilon}, h_{p}, ...); \\; \\ R_{a} = f(h_{\delta}, h_{\epsilon}, h_{p}, d, ...); \\; \\ l, d, ... = f(\Lambda, \Psi, ...). \end{cases}$$
(2.10)

3. Описание граничных и начальных условий решения задач механики технологического наследования. Используются системы уравнений (2.9-2.10), определяющие граничные условия. К начальным условиям относят условия на контакте, значения напряжений на передней внеконтактной границе очага деформации, глубину упрочнения, распределение твердости в очаге деформации и по глубине поверхностного слоя, свойства материала, в том числе, в виде кривой течения и диаграммы пластичности и другие. Для уточнения описания используются вспомогательные зависимости

традиционных параметров качества поверхностного слоя от элементов режима обработки:

$$\begin{cases} R_{a} = f(P, S, n, R_{np}, HV, ...); \\ h = f(P, S, n, R_{np}, HV, ...); \\ \delta = f(P, S, n, R_{np}, HV, ...); \\; \\ (T\sigma_{ij})_{ocm} = f(P, S, n, R_{np}, HV, ...), \\ \end{cases}$$

$$(2.11)$$

где R_a , h, δ , $(T\sigma_{ij})_{ocm}$ - единичные параметры качества поверхностного слоя (среднее арифметическое отклонение профиля, глубина и степень упрочнения, тензор остаточных напряжений и др.).

4. Решаются задачи механики деформирования в наследственной постановке, определяются характеристики тензоров напряжений $(T\sigma)_{ij}$, деформаций $(T\varepsilon)_{ij}$, скоростей деформаций $(T\xi)_{ij}$, остаточных напряжений $[(T\sigma)_{ocm}]_{ij}$ вдоль линий тока и по глубине упрочненного поверхностного слоя.

5. Формируются квазимонотонные участки пластической деформации и программы нагружения в виде $\Lambda = \Lambda(\Pi)$ на каждом из них.

С позиций последующего рассмотрения формирования очагов деформации с учетом ТН введем параметр, известный в механике как угол вдавливания:

$$\theta = \arcsin\frac{d}{R_{np}}.$$
(2.12)

Как будет показано ниже, значение угла вдавливания θ применительно к упрочняющему ППД не превышает (30-32)⁰. Исследования показали, что при больших значениях этого угла происходит разрушение металла, которое наблюдается вдоль передней внеконтактной поверхности ABC и, чаще всего, в вершине пластической волны (точке C). Подобное возможно либо при уменьшении R_{np} , либо при увеличении действительного натяга h_{δ} , либо при одновременном действии этих факторов. Можно полагать, что подобное

разрушение при ППД означает начало процесса нестационарного резания с образованием микростружки в вершине волны.

Определим возможность аналитического описания программ нагружения при ППД. Будем полагать, что влияние ТН проявляется в "затухающем" характере изменения ПН в очаге деформации, который предполагает уменьшение размаха показателя схемы и снижение скорости накопления степени деформации сдвига вдоль линий тока.

В физике затухающие процессы описывают экспоненциальными зависимостями. Например, процессы заряда и разряда конденсатора, процессы распада в атомной физике, затухающие колебания системы и др. Хорошие приближения для описания распределений случайных величин дает распределение Гауса. Экспоненциальными зависимостями отписывают процессы затвердевания бетона, ползучесть и другие.

Воспользуемся исходными данными, приведенными в работах [18-20].

На рис. 2.5 представлена модель В.М. Смелянского и В.В. Баринова, описывающая ПН для передней внеконтактной поверхности ОД при ППД, а на рис. 2.6 - графическая модель программ нагружения для очага деформации в целом [21-22]. Анализ показал, что изменение ПН при переходе из одной квазимонотонной зоны ОД в другую происходит почти мгновенно (участки 1-2 и 2-3, рис. 2.6).

Согласно результатам авторов статьи [23], для описания программ нагружения в виде $\Pi = \Pi(\Lambda)$ могут быть приняты формулы, представленные в таблице 2.1.

После преобразований и замены автором настоящего исследования были получены выражения, описывающие ПН в виде $\Lambda = \Lambda(\Pi)$ (таблица 2.2).

Результаты моделирования по формулам таблицы 2.2 представлены на рис. 2.7, а на рис. 2.8 совмещены ПН, полученные по данным публикаций [18-20].

Таблица 2.1

Этап нагружения	Степень деформации сдвига	Модель на этапе	
Передняя			
внеконтактная	$\theta < \Lambda \leq \theta, 29$	$\Pi = 1,147\Lambda^{1,25} - 0,577$	
поверхность			
Контактная	$0.29 < \Lambda < 0.52$	$\Pi = (365 \Lambda = 57 7)(173 \Lambda = 0.75)^3 = 1.15$	
поверхность	0,27 < 11 20,52	H = (303H - 37, 7)(1, 73H - 0, 73) - 1, 13	
Задняя			
внеконтактная	$\theta,52 < \Lambda \leq \theta,61$	$\Pi \approx -0,577$	
поверхность			

Зависимости для описания программ нагружения в виде $\Pi = \Pi(\Lambda)$

Таблица 2.2

Зависимости для описания программ нагружения в виде $\Lambda = \Lambda(\Pi)$

Этап нагружения	Степень деформации сдвига	Модель на этапе
Передняя		
внеконтактная	$\theta < \Lambda \leq \theta, 29$	$\Lambda_{_{{\scriptscriptstyle {\cal B}}{H}}}=(0,87\Pi+0,5)^{0,8}$
поверхность		
Контактная	$0.20 < \Lambda < 0.52$	Λ =
поверхность	$0,29 \leq T \leq 0,52$	$\Pi = \Pi (\Pi (\Pi (-3,056\Pi - 12,415) - 16,507) - 9,232)$
Задняя		
внеконтактная	$\theta,52 < \Lambda \leq \theta,61$	$\Pi \approx -0,577$
поверхность		

Анализ показал, что существующие модели не дают общего описания программ нагружения. Более того, их использование предполагает всякий раз наличие достаточно большого числа экспериментальных данных. Другим важным обстоятельством является то, что эти модели не учитывают историю нагружения. В этом плане необходима информация о методах обработки, предшествовавших обработке ППД.



Рис. 2.5. Программа нагружения для передней внеконтактной поверхности для стали 45 и сплава АК6: модель $\Lambda_{_{en}} = (\Pi + 1)^{_{0,44}}$



Рис. 2.6. Программы нагружения: 1, 2, 3 - соответственно для передней внеконтактной, контактной и задней внеконтактной поверхностей



Рис. 2.7. Программы нагружения для очага деформации по результатам [20]:
1, 2, 3 - соответственно для передней внеконтактной, контактной и задней внеконтактной поверхностей



2 - по данным [20]

Оценим возможность аналитического описания с помощью модели вида (рис. 2.9 - 2.11):

$$y = a + \frac{1}{exp(bx^2 + cx + d)}$$
 (2.13)

Анализ формулы по рис. 2.9 позволил получить достаточно простое выражение ПН для передней внеконтактной поверхности:

$$\Lambda = -0,117 + \frac{1}{exp(13,68\Pi^{2} + 17,75\Pi + 6,35)} =$$

$$= -0,117 + \frac{1}{exp[13,68(\Pi^{2} + 1,298\Pi + 0,464)]} = ,$$

$$-0,117 + \frac{1}{exp[13,68(\Pi + 0,68)^{2}]} = -0,117 + e^{-13,68(\Pi + 0,68)^{2}}$$

ИЛИ

$$\Lambda = -\theta, 117 + \exp\left(-13,68(\Pi + \theta, 68)^2\right).$$
(2.14)



Рис. 2.9. Программа нагружения для передней внеконтактной поверхности по экспериментальным данным [18-19]: модель

$$\Lambda = -0,117 + \frac{1}{exp\left(13,68\Pi^2 + 17,75\Pi + 6,35\right)}$$



Рис. 2.10. Программа нагружения для контактной поверхности по экспериментальным данным [18-19]: модель





Рис. 2.11. Программа нагружения для задней внеконтактной поверхности по экспериментальным данным [18-19]:

модель
$$\Lambda = \theta, 1 + \frac{1}{exp(-\theta, 6\Pi^2 - \theta, 66\Pi + \theta, 18)}$$

Выражение (2.14) является важным, т.к. позволяет в зависимости от характера накопления деформаций воспроизвести нарастающий или затухающий вид этого накопления.

Для контактной поверхности последняя модель не подходит, а подходит более сложная модель, причем в качестве аргумента выступает степень деформации сдвига (рис. 2.10):

$$y = a + \frac{b}{(cx+d)^{2} + (exp(ex^{2} + fx + g))}.$$
 (2.15)

В общем случае для задней внеконтактной поверхности также подходит экспоненциальная зависимость (рис. 2.11).

Примем графическую обобщенную модель нагружения в соответствии со схемой на рис. 2.12. Схема состоит из трех этапов 1, 2 и 3, каждому из которых соответствует своя программа нагружения. Предположим, что материал не имеет истории нагружения и принципиально возможно описание программ нагружения на каждом этапе с помощью функции плотности нормального распределения. Плотность распределения выражается формулой:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}.$$
 (2.16)

В формуле (2.16) математическое ожидание случайной величины равно a, дисперсия равна σ^2 .

При разработке обобщенной модели приняты следующие предположения и допущения:

- Программа нагружения состоит из трех этапов квазимонотонной деформации;
- Смена знака деформации на границе этапов происходит скачкообразно, соответственно, скачкообразно изменяется численное значение показателя схемы;
- Программа нагружения на каждом квазимонотонном этапе может быть описана левой ветвью функции плотности нормального распределения;

- Накопление деформаций в очаге деформации происходит непрерывно;
- Программа нагружения на каждом следующем этапе стартует с некоторого накопленного ранее значения деформаций;
- Вид ПН на каждой следующей стадии нагружения определяется историей нагружения.



Рис. 2.12. Схема обобщенной модели программы нагружения процесса ППД: 1,2,3 - участки квазимонотонной деформации: 4 - контур очага деформации

Обобщенная модель программы нагружения на первом этапе квазимонотонной деформации при использовании левой ветви графика плотности нормального распределения выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} A_i = \frac{1}{\sigma_{\Pi} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Pi_i - \Pi_j)^2}{2\sigma_{\Pi}^2}}; \\ \Pi_{|i=0} = \Pi_o \approx -0,577; \\ A_{|i=0} = A_o \approx 0; \\ \Pi_{|i=j} = \Pi_j = \Pi_e, \end{cases}$$
(2.17)

где Λ_i , Π_i - соответственно текущие значения степени деформации сдвига и показателя схемы на первом этапе; Λ_j , Π_j - соответственно значения степени деформации сдвига и показателя схемы по окончании первого этапа, причем показатель схемы соответствует показателю в вершине волны, т.е. $\Pi_j = \Pi_e$; $(\sigma_{\Pi})^2$ - дисперсия показателя схемы на первом этапе.

Начальные значения показателя схемы и степени деформации сдвига, безусловно, зависят от истории нагружения и могут отличаться от принятых в модели (2.17) значений. Тогда программа нагружения 1-го этапа стартует с некоторого накопленного значения степени деформации сдвига. Для реализации модели (2.17) требуется знание значения $\Pi_j = \Pi_e$ и дисперсии показателя схемы на первом этапе $(\sigma_{\Pi})^2$.

В соответствии с данным типом описания между первым и вторым этапами происходит скачкообразное изменение показателя схемы напряженного состояния, что свидетельствует о нарушении монотонности процесса. Деформации на этом этапе продолжают накапливаться, а обобщенная модель программы нагружения при использовании левой ветви графика плотности нормального распределения выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \Lambda_{i} = \Lambda_{k} + \frac{1}{\sigma_{\Pi} \sqrt{2\pi}} e^{\frac{(\Pi_{i} - \Pi_{i})^{2}}{2\sigma_{\Pi}^{2}}}; \\ \Pi_{|i=k} = \Pi_{k}; \\ \Lambda_{|i=k} = \Lambda_{j}; \\ \Pi_{|i=l} = \Pi_{l}, \end{cases}$$
(2.18)

где Λ_i, Π_i - соответственно текущие значения степени деформации сдвига и показателя схемы на втором этапе; Λ_k, Π_k - соответственно значения степени деформации сдвига и показателя схемы на старте второго этапа; Λ_i, Π_i соответственно значения степени деформации сдвига и показателя схемы по окончании второго этапа; $(\sigma_{\Pi})^2$ - дисперсия показателя схемы на втором этапе. Для реализации модели (2.18) требуется знание значения показателя схемы в момент начала Π_k и окончания Π_l нагружения и дисперсии показателя схемы $(\sigma_n)^2$ на втором этапе.

В соответствии с данным типом описания между вторым и третьим происходит скачкообразное изменение показателя этапами схемы напряженного состояния, что также свидетельствует о нарушении процесса. Деформации продолжают монотонности на ЭТОМ этапе обобщенная модель программы нагружения накапливаться, a при использовании левой ветви графика плотности нормального распределения выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \Lambda_{i} = \Lambda_{m} + \frac{1}{\sigma_{\Pi} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Pi_{i} - \Pi_{n})^{2}}{2\sigma_{\Pi}^{2}}}; \\ \Pi_{|i=m} = \Pi_{m}; \\ \Lambda_{|i=m} = \Lambda_{l}; \\ \Pi_{|i=n} = \Pi_{n} \approx -0,577, \end{cases}$$

$$(2.19)$$

где Λ_i, Π_i - соответственно текущие значения степени деформации сдвига и показателя схемы на третьем этапе; Λ_m, Π_m - соответственно значения степени деформации сдвига и показателя схемы на старте третьего этапа; Λ_n, Π_n - соответственно значения степени деформации сдвига и показателя схемы по окончании третьего этапа; $(\sigma_n)^2$ - дисперсия показателя схемы на третьем этапе. Реализация модели (2.19) требует знания показателя схемы на старте третьего этапа Π_m и дисперсии дисперсия показателя схемы на этом этапе $(\sigma_n)^2$.

Стартовое значение показателя схемы на первом этапе и финишное значение на третьем этапе приняты равными $\Pi \approx -0.577$. Это соответствует представлениям о начале и окончании пластического течения металла в очаге деформации, характерным для начала пластического течения материала в условиях простого сжатия [21]. В зависимости от вида решаемой задачи механики эти значения могут отличаться от принятых в предлагаемых моделях.

Таким образом, особенностью описания вышеприведенными моделями является знание величин показателя схемы только в характерных точках очага деформации. Величины показателей схемы в эти характерных точках ОД характеризуют математические ожидания величины *П*. Возможным вариантом их определения является накопление статистик и использование описания вида:

$$\Pi = \Pi(\boldsymbol{h}_i, \boldsymbol{d}_i, \boldsymbol{l}_i, \dots). \tag{2.20}$$

При этом геометрические параметры определяются по зависимостям вида (2.9) и (2.10) с учетом затухающего характера формирования ОД по мере исчерпания запаса пластичности материалом поверхностного слоя. Тогда в уравнения (2.17-2.19) подставляются модели показателя схемы в функциях параметров очага деформации.

Величина σ_{π}^{2} характеризует дисперсию показателя схемы напряженного состояния. Возможные варианты ее определения:

- В первом приближении дисперсия σ_π² принимается постоянной для программ нагружения различных этапов и равной дисперсии параметров очага деформации.
- Более точным является определение дисперсии по накопленным статистикам параметра схемы напряженного состояния и уточнение их для каждой стадии с учетом истории нагружения.

Очевидно, что при наличии истории нагружения ПН на данной стадии стартует с некоторого накопленного (наследуемого) значения степени деформации сдвига.

Таким образом, описание ТН в категориях программ нагружения предполагает, с одной стороны, что накопление деформаций, формирование ПН и исчерпание запаса пластичности осуществляется в ОД, параметры которого зависят от истории нагружения. С другой стороны, трансформация (затухание) ПН может быть описана с учетом истории нагружения.

Как было показано выше, все компоненты НДС и исчерпания запаса пластичности на каждой из трех стадий нагружения рассматривались вдоль

одних и тех же линий тока. При этом первая линия тока располагалась на глубине 0,217 мм. Поэтому все распределения степени деформации сдвига и СИЗП были приведены к уровню первой линии тока путем экстраполяции значений по аппроксимационным моделям: для первой стадии нагружения - первого рабочего хода: $\Lambda_1 = 2,68 exp(-6,1h)$; для второй стадии нагружения - второго рабочего хода: $\Lambda_2 = 0,41 exp(-1,63h)$; для третьей стадии нагружения - третьего рабочего хода: $\Lambda_3 = 0,31 exp(-1,46h)$. На рис. 2.13 показано распределение степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя на трех стадиях нагружения.

При построении программ нагружения была выделена наиболее активная часть очагов деформации, соответствующая их геометрическим параметрам, и проведено сглаживание в соответствии с исходными данными, приведенными в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Степень деформации сдвига и показатели схемы, соответствующие началу и концу программы нагружения на этапе

№ этапа	$oldsymbol{\Lambda}_{ heta}$	$\Pi_{ heta}$	Λ_k	Π_k
11	0	-0,763	0,406	-1,44
12	0,406	-1,44	0,714	0,728
13	0,714	0,728	0,715	0,483
21	0,722	-0,589	0,803	-0,647
2_{2}	0,827	-0,617	0,872	0,489
23	0,872	0,489	0,874	0,407
31	0,874	-0,632	0,977	-0,499
32	0,977	-0,596	1,036	0,365
33	1,036	0,365	1,038	0,288

В результате получили пути в виде программ нагружения по стадиям и этапам (рис. 2.14). Графики построены таким образом, что программа нагружения первого этапа стартует с нулевого значения степени деформации сдвига, а каждая последующая - с накопленного на предшествующей стадии значения. На рис. 2.14 обозначены: линия 4 - линия стартов первых этапов программ нагружения по 1, 2 и 3 стадиям; линия 5 - линия финишей первых и стартов вторых этапов программ нагружения по 1, 2 и 3 стадиям; линия 6 - линия финишей вторых и стартов третьих этапов программ нагружения по 1, 2 и 3 стадиям; линия 7 - линия финишей третьих этапов и, соответственно, программ нагружения по 1, 2 и 3 стадиям; точка А - точка на диаграмме, в которой накоплена предельная для данного материала деформация и в которой произошло полное исчерпание запаса пластичности.

В соответствии с принятыми положениями, по мере накопления деформации и исчерпания запаса пластичности на каждой последующей стадии происходит "затухание" программ нагружения. Это заключается в том, что на каждой последующей стадии накапливается меньше деформации, чем на предшествующей, при меньшем диапазоне изменения показателя схемы напряженного состояния (таблица 2.4, рис. 2.15).



Рис. 2.13. Распределение степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя для 1, 2 и 3 стадий нагружения (рабочих ходов)







Рис. 2.15. Уменьшение прироста степени деформации сдвига по стадиям нагружения

№ стадии	$\Delta \Lambda$	$\Delta \Pi$
1	0,715	$-0,783 \leq \Delta \Pi \leq 0,483$
2	0,16	$-0,589 \leq \Delta \Pi \leq 0,407$
3	0,164	$-\theta,632 \leq \Delta \Pi \leq \theta,288$

Итоговые значения параметров деформации по стадиям нагружения

Программы нагружения по этапам квазимонотонной деформации были представлены в виде совокупности экспоненциальных моделей (таблица 2.5).

Таблица 2.5

№ этапа	Модель программы нагружения на этапе
11	$\Lambda = 14,51 \cdot exp(-((\Pi + 2,46)^2)/0,292)$
12	$\Lambda = 0,72 \cdot exp(((-\Pi + 0,43)^2) \cdot (-0,023))$
13	$\Lambda = 0,71 \cdot exp(-((\Pi - 0,48)^2) \cdot 0,056)$
21	$\Lambda = 0,72 \cdot exp(-((\Pi + 0,6)^2) \cdot (-51,081))$
22	$\Lambda = 0,88 \cdot exp(((-\Pi + 0,24)^2) \cdot (-0,071))$
23	$\Lambda = 0,89 \cdot exp(-((\Pi + 0,67)^2)/(50,575))$
31	$\Lambda = 0,07 \cdot exp(-((-\Pi - 2,77)^2) \cdot (-0,574))$
32	$\Lambda = 1,14 \cdot exp(((-\Pi + 3,83)^2) \cdot (-0,008))$
33	$\Lambda = 1,04 \cdot exp(-((-\Pi - 0,01)^2) \cdot (0,025))$

Модели программ нагружения по этапам квазимонотонной деформации

По мере исчерпания запаса пластичности на каждой следующей стадии накапливается все меньше деформации и материал ведет себя как на стадии циклирования. Речь идет о том, что показатель схемы напряженного состояния изменяется от состояния, близкого к сжатию, до состояния, близкого к растяжению.

Оценим скорость изменения программ нагружения, соответственно скорость накопления деформаций, для чего проведем дифференцирование моделей программ нагружения по параметру схемы напряженного состояния.

Обращает на себя внимание тот факт, что скорости ПН меняют свой знак в точках смены вида напряженного состояния (рис. 2.16). На втором и третьем этапах скорость практически не изменяется, т.е. накопление деформации происходит с почти постоянной скоростью. Более того, наблюдается определенная закономерность в изменении скорости накопления деформаций в зависимости от накопленной (наследуемой) деформации. Видно, что каждая последующая стадия нагружения приводят к уменьшению скорости Λ' , а в момент окончания 3 стадии нагружения эта скорость близка к нулю.

Расчеты по модели Калпина-Филиппова позволили получить значения СИЗП вдоль линий тока и по глубине поверхностного слоя. Наиболее интенсивное исчерпание запаса пластичности происходит в передней внеконтактной зоне очага деформации (рис. 2.17 - 2.18). При этом значения Ψ практически совпадают для второго и третьего рабочих ходов деформирующего инструмента (таблица 2.6).

Таблица 2.6

Итоговые значения степени исчерпания запаса пластичности по стадиям

№ стадии	ΔΛ	$\Delta \Psi$ по расчету	$\Delta \Psi$ по модели
1	0,715	0,432	0,580
2	0,16	0,281	0,212
3	0,164	0,281	0,208
Сумма	1,04	0,994	1,000

нагружения

Таким образом, за 3 рабочих хода (стадии нагружения) накоплены предельные деформации и произошло полное исчерпание запаса пластичности материалом поверхностного слоя.



Рис. 2.16. Зависимость скорости накопления деформации в точках нарушения монотонности от накопленной деформации: 1,2,3 - стадии нагружения при ППД



Рис. 2.17. Исчерпание запаса пластичности вдоль первой линии тока: 1,2,3 - номер рабочего хода



Рис. 2.18. Распределение запаса пластичности по глубине упрочненного поверхностного слоя вдоль 1 линии тока: 1,2,3 – номер рабочего хода

Рассмотрим структуру критерия Калпина-Филиппова. Первая составляющая критерия Ψ_i зависит от напряжения текучести σ_i (или от накопленной деформации Λ_i); вторая составляющая Ψ_2 зависит от отношения Λ_i / Λ_p , а итоговое значение определяется суммой $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$. Из рис. 2.19 видно, что наибольший вклад в суммарное значение Ψ вносит первая составляющая Ψ_1 . В структуре второй составляющей Ψ_2 значения накапливаемой Ψ_{21} и залечиваемой Ψ_{22} компонент сопоставимы по величине, но противоположны по знаку. Модель исчерпания запаса пластичности Калпина-Филиппова можно считать наследственной, учитывающей историю нагружения: чем больше накопленная деформация и сложнее история нагружения (чем в большей мере нарушается монотонность процесса деформирования), тем интенсивнее происходит залечивание дефектов.

Учитывая сказанное, использованный и остаточный запас пластичности могут быть представлены в виде графической модели по

стадиям нагружения при ППД (рис. 2.20), а зависимость $\Psi = \Psi(\Lambda)$ имеет общий характер для данного структурного состояния материала (рис. 2.21).

Функция степени исчерпания запаса пластичности описана выражением:

$$\Psi(\Lambda) = 1,064 \cdot exp(-((\Lambda - 1,27)^2) \cdot 2).$$
(2.21)

Из формулы (2.21) видно, что знание наследственных закономерностей накопления деформаций, по сути программ нагружения, позволяет оценить исчерпанный и остаточный запас пластичности.



Рис. 2.19. Зависимость составляющих критерия использования запаса пластичности от накопленной степени деформации сдвига по стадиям нагружения



и остаточного ($\Psi_{ocm} = 1 - \Psi$) запаса пластичности по стадиям нагружения



Рис. 2.21. Наследственная модель исчерпания запаса пластичности с учетом залечивания дефектов по стадиям нагружения при ППД

Подтверждением сказанному является представление процессов в категориях 3D диаграмм (рис. 2.22). Здесь на горизонтальной плоскости

отложены степень деформации сдвига и показатель схемы напряженного состояния, в категориях которых описываются программы нагружения, а по вертикали–степень исчерпания запаса пластичности. Таким образом, показано исчерпание запаса пластичности в категориях наследственных программ нагружения.



Рис. 2.22. 3-D модель исчерпания ресурса пластичности в категориях программ нагружения: 1,2,3 – стадии нагружения

Наследственные закономерности могут быть представлены в категориях скоростей исчерпания запаса пластичности (рис. 2.23):

$$\Psi'(\Lambda) = -4,256 \cdot (\Lambda - 1,27) \cdot \left(exp\left(-\left((\Lambda - 1,27)^2 \right) \cdot 2 \right) \right).$$
(2.22)

На этом же рисунке представлены программы нагружения, но в виде $\Pi = \Pi(\Lambda)$. Видно, что уже на третьей стадии нагружения скорость исчерпания запаса пластичности под воздействием истории нагружения стабилизируется.



Рис. 2.23. Зависимости скорости СИЗП и показателя схемы от накопленной степени деформации сдвига по стадиям нагружения: 1,2,3 – стадии нагружения

Можно утверждать, что установлены закономерности механики технологического наследования в категориях программ нагружения и степени исчерпания запаса пластичности.

2.3. Аналитическая модель программы нагружения и наследственные закономерности исчерпания запаса пластичности на стадии циклической долговечности

Определение параметров деформированного состояния производится с учетом наследственных свойств поверхностного слоя и сложного характера изменения напряженного состояния в каждом цикле усталостного нагружения.

Во-первых, в каждом цикле в соответствии с предполагаемым синусоидальным характером приложения внешней нагрузки можно выделить

максимальное $(\sigma_a)_{max}$ и минимальное $(\sigma_a)_{min}$ значения амплитуды усталостных напряжений. Во-вторых, в каждом цикле происходит частичная релаксация остаточных напряжений. В-третьих, в каждом цикле происходит неоднократное изменение значений действующих напряжений и показателя схемы напряженного состояния.

Таким образом, в каждом цикле усталостного нагружения можно выделить монотонные участки, на границах которых меняется характер накопления деформаций. В соответствии с немонотонностью развития деформаций в каждом цикле будет происходить исчерпание запаса пластичности и частичное залечивание дефектов при смене знака деформации.

И, наконец, существует некая материальная частица, расположенная в определенном сечении и на определенной глубине от поверхности, где наиболее вероятно появление следов разрушения. По всей видимости, таким сечением будет то, в котором имеет место наиболее "жесткая" схема нагружения. Поэтому достаточным будет проведение оценки накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности в этом сечении и именно в этой материальной точке, названной точкой вероятного разрушения.

Определение параметров деформаций производится исходя из известных параметров действующего напряженного состояния и единой кривой течения: рассчитывается интенсивность напряжений σ_i ; определяется интенсивность деформаций ε_i ; по известным параметрам времени в каждом цикле нагружения определяются скорости деформаций ξ_i ; проводится расчет интенсивности скоростей деформаций сдвига *H* и степени деформации сдвига Λ .

Вышеприведенная последовательность расчетов деформированного состояния предполагает, что этот процесс является итерационным, т.к. неизвестны вид программы нагружения, размах пластической деформации в каждом цикле, закономерности его изменения по мере накопления

деформаций и влияние истории нагружения на характер исчерпания запаса пластичности. Поэтому приняли, что:

1. Размах пластической деформации в знакопостоянной части цикла в первом приближении может быть описан модифицированным уравнением Коффина–Менсона; размах пластической деформации зависит от истории нагружения, но в первом приближении может быть принят постоянным в течение всего циклического нагружения.

2. Сначала может быть сформулирована программа нагружения с учетом истории нагружения, а затем программа нагружения может быть скорректирована с учетом связи напряженного и деформированного состояний, а также сложного характера изменения напряженного состояния в каждом цикле.

3. Итеративным путем может быть уточнена зависимость размаха пластической деформации в цикле от истории нагружения.

Оценим распределение параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) по глубине поверхностного слоя и трансформацию этих параметров в процессе циклического (усталостного) нагружения (рис. 2.24).

По окончании механической обработки в поверхностном слое имеет НДС, место остаточное характеризуемое распределением степени деформации сдвига Λ_{mex} и степени исчерпания запаса пластичности Ψ_{mex} на глубину h_{mor}, также тензора остаточных напряжений $(T\sigma)_{acm}$, a уравновешенных в пределах детали.

Старт стадии циклической долговечности означает циклическое изменение показателя схемы напряженного состояния в каждой точке поперечного сечения детали. Можно предположить, что вследствие неравномерного характера распределения компонент тензора остаточных напряжений эпюры показателя схемы будет изменяться от некоторого максимального Π^+ до некоторого минимального Π^- значений в каждом рассматриваемом сечении детали. Из рис. 2.24 видно, что существует сечение, в котором схема нагружения является наиболее "жесткой". Это

сечение соответствует координате точки вероятного разрушения с глубиной расположения *h_p*. Подобное высказывание будет справедливым, если координата этой точки не будет подвержена флуктуации, что характерно для равномерного и пропорционального снижения уровня остаточных напряжений в процессе циклирования.



Рис. 2.24. Распределение параметров напряженно-деформированного состояния по глубине упрочненного поверхностного слоя

Таким образом, принято, что на стадии циклической долговечности в поверхностном слое происходят процессы, описываемые совокупностью рассмотренных ранее кинетических уравнений. Более того, существует программа нагружения, описывающая накопление деформаций в каждом цикле вплоть до появления первых признаков нарушения сплошности материала в точке вероятного разрушения. Предельное состояние материала также описывается диаграммой пластичности, вид которой не изменяется при переходе от одной стадии нагружения к другой. Предельное состояние наступит, когда накопленная степень деформации сдвига достигнет

предельной, характерной для данного показателя схемы напряженного состояния.

Иными словами, программа нагружения может быть представлена в известных координатах "показатель схемы напряженного состояния-степень деформации сдвига". Рассмотрим возможную конфигурацию программы нагружения на стадии циклической долговечности в точке вероятного разрушения (рис. 2.25).



Рис. 2.25. Программа нагружения на стадии циклической долговечности с учетом наследственной деформации в зависимости от изменения знака цикла: 1-2 – огибающие программы нагружения при отрицательном и положительном значении напряжения цикла; 3 – огибающая программы нагружения при среднем в цикле показателе схемы; 4 – ступенчатая программа нагружения при изменении напряжений цикла от положительного до отрицательного значений

Программа нагружения стартует с некоторого накопленного на стадиях механической обработки значения степени деформации сдвига $\Lambda_{_{mex}}$, что соответствует исчерпанию запаса пластичности на величину $\Psi_{_{mex}}$ и

возникновению остаточных напряжений $(T\sigma)_{ocm}$ в точке вероятного разрушения с глубиной расположения h_p . Изменение напряжений от максимальных $(\sigma_a)_{max}$ до минимальных $(\sigma_a)_{min}$ в каждом цикле нагружения приводит к частичной релаксации остаточных напряжений. Поэтому в каждом цикле происходит изменение показателя схемы (ломаная линия 4, рис. 2.25) от некоторого максимального до некоторого минимального значений.

Очевидно, что различная история нагружения приводит к различным конфигурациям программ нагружения, что означает различную кривизну линий, наклон этих линий к осям координат, размах значений показателя схемы и степени деформации в каждом цикле.

Исходя из общей логики рассуждений, будем считать, что:

1. В каждом цикле имеют место несколько участков квазимонотонной деформации.

2. По мере накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности с уменьшением влияния сжимающих остаточных напряжений размах показателя схемы в цикле возрастает.

3. На старте нагружения действуют только сжимающие остаточные напряжения, в процессе нагружения - остаточные и циклические напряжения, а на финише - только циклические напряжения.

4. Аналитически программа нагружения может быть описана функцией вида:

$$\Lambda = \Lambda_{mex} + \frac{a}{\left(exp\left(-b\overline{\Pi}^{c}\right)\right)^{d}},$$
(2.23)

где входящие в эту формулу коэффициенты зависят от истории нагружения. Последняя формула по структуре соответствует формуле (2.6), принятой для стадий резания и ППД.

На наш взгляд, программа нагружения для стадии циклической долговечности (*ПН*)_{цд} имеет те же особенности, что и на стадиях механической обработки. В частности:

 Увеличение накопленной на стадиях механической обработки степени деформации сдвига приводит к смещению (ПН)_{ид} в область "жестких" схем, т.е. в положительном направлении оси абсцисс.

2. Увеличение накопленной на стадиях механической обработки степени деформации сдвига приводит к "сжатию" (*ПН*)_{ид} вдоль оси деформаций и уменьшению скорости накопления деформации.

По всей видимости, роль истории нагружения заключается во влиянии на качественную и количественную картину накопления деформаций влиянии на программу нагружения, накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности на стадии циклической долговечности. Поэтому можно принять, что проявление наследственности может быть описано в категориях программ нагружения, а сама программа нагружения на стадии циклической долговечности является функционалом от истории нагружения, описываемой в категориях программ нагружения на стадиях механической обработки, т.е.

$$(\Pi H)_{III} = \prod_{i=n}^{i-1} (\Pi H)_{Mex}.$$
 (2.24)

Завершается рассматриваемая стадия полной релаксацией остаточных напряжений и полным исчерпанием запаса пластичности. Этому состоянию соответствуют первые признаки несплошности материала в виде дефектов размером 0,02-0,2 мм. Появление этих видимых дефектов означает начало новой стадии - стадии циклической трещиностойкости. В этот момент времени:

• В точке с координатой h_p степень исчерпания запаса пластичности $\Psi = 1$;

• Показатель схемы изменяется в пределах $-0,577 \le \Pi \le +0,577$. На рис. 2.24 обозначения $(\Pi)_{fin}^-$ и $(\Pi)_{fin}^+$ соответствуют значениям показателей схемы на финише стадии циклической долговечности при минимальном и максимальном значении амплитуды напряжений от внешней нагрузки;

 Произошло увеличение поврежденности в направлении к поверхности детали, что описывается эпюрой степени исчерпания запаса пластичности *Ψ*';

• Произошло увеличение поврежденности в направлении к оси детали до глубины $h_{u.o.}$, что описывается эпюрой степени исчерпания запаса пластичности Ψ'' .

Можно полагать, что поверхностный слой по своим свойствам в этот момент времени является еще более неравномерным; границей этой неравномерности является несплошность в виде начальной усталостной трещины.

Расчетно-экспериментальным путем было определено деформированное состояние после механической обработки, включавшей резание и поверхностное пластическое деформирование (таблица 2.7).

Таблица 2.7

Расчетные значения деформационных показателей в исследуемых выборках

№ выборки	Λ
1	0,46
2	0,67
3	0,672
4	0,758
5	1,06
6	1,196
7	1,244

Определение толщины упрочненного поверхностного слоя производилось экспериментальным путем и уточнялось по формуле:

$$h = 1, 5\sqrt{d} . \tag{2.25}$$

При выполнении расчетов приняли распределение степени деформации сдвига по глубине поверхностного слоя в соответствии с распределением твердости [24]:

$$\Lambda(y) = \left[\Lambda^{0,574} \exp\left(-\left(\frac{2,22(d+d_1)}{h}\right)\left(\frac{\Delta-y}{h}\right)^2\right)\right]^{1,742},$$
 (2.26)

где у - ордината расположения точки поверхностного слоя.

По результатам испытаний приняли кривую течения в виде:

$$\sigma_i = 36 + 63, 2\Lambda^{0,574}. \tag{2.27}$$
Результаты расчетов деформационных параметров в точке вероятного разрушения представлены в таблице 2.8.

Очевидно, что сложный наследственный характер изменения напряженного состояния в процессе усталостного нагружения приводит и к сложному характеру накопления деформаций И исчерпания запаса пластичности. Определим основные закономерности накопления деформаций, имея ввиду необходимость: оценки немонотонности ее развития и учета истории нагружения; описания этого накопления в категориях программ нагружения; выполнения основных соотношений напряженного и деформированного состояний.

Таблица 2.8

Результаты расчетов степени деформации сдвига в точке вероятного

N⁰	4	<i>d</i> ,	h,	A(v)
серии	Λ	MM	MM	Π())
1	0,46	1,26	1,684	0,419
2	0,67	1,26	1,684	0,546
3	0,672	1,69	1,95	0,530
4	0,758	1,65	1,927	0,586
5	1,06	1,83	2,029	0,793
6	1,196	1,95	2,095	0,888
7	1,244	1,89	2,062	0,902

разрушения

В соответствии с принятыми представлениями на стадии усталостного нагружения продолжается накопление деформаций, причем программа этого нагружения стартует с накопленного на стадиях механической обработки значения. Предельные для данной схемы нагружения деформации описываются диаграммой пластичности для данного материала при данном показателе схемы напряженного состояния. По мере продолжающегося деформаций накопления происходит постепенное исчерпание запаса пластичности материалом поверхностного слоя точке вероятного В разрушения. В каждом цикле нагружения происходит изменение показателя

схемы напряженного состояния (смена знака деформации), накопление и частичное залечивание дефектов.

Существует ряд труднопреодолимых препятствий, не позволяющих получить корректное замкнутое решение в терминах и категориях механики деформирования. Эти трудности, прежде всего обусловлены тем, что не получены точные аналитические решения, описывающие кинетику материала в точке вероятного разрушения. Это связано со сложностью идентификации очага деформации и оценки деформированного состояния при нагружении в каждом цикле.

Кроме того, уровень деформаций в каждом цикле многоциклового нагружения настолько мал, что его относят к категории неупругих деформаций. При напряжениях, соответствующих пределу выносливости, деформации находятся на уровне приведенных в таблице 2.9 [22].

Таблица 2.9

ЗОХ10Г10 22,6 ОХ14АГ12М 23 Сталь 30 1,0	Материал	$\Delta \varepsilon_{-1} * 10^{-5}$
0Х14АГ12М 23 Сталь 30 1,0	30Х10Г10	22,6
Сталь 30 1,0	0Х14АГ12М	23
	Сталь 30	1,0
Сталь 60 5,6	Сталь 60	5,6
15Г2АД пс 36	15Г2АД пс	36
Чугун СЧ 21-40 <1,0	Чугун СЧ 21-40	<1,0
Бронза Бр АЖ9 <1,0	Бронза Бр АЖ9	<1,0
Латунь Л62 <1,0	Латунь Л62	<1,0

Значения величин неупругих деформаций за один цикл

Тем не менее, на феноменологическом уровне возможно получение описания в категориях механики деформирования, для чего сформулируем основные допущения [25-26]:

1. Программа нагружения, как и на стадиях механической обработки, может быть описана в виде $\Lambda = \Lambda(\Pi)$.

2. Программа нагружения на стадии циклической долговечности стартует с деформации, накопленной на предшествующих стадиях.

3. Предельные для данной схемы нагружения деформации описываются диаграммой пластичности для данного материала.

4. Размах пластической деформации в знакопостоянной части цикла может быть описан модифицированным уравнением Коффина–Менсона. Размах пластической деформации зависит от истории нагружения, но в первом приближении может быть принят постоянным в течение всего циклического нагружения.

5. Сначала может быть сформулирована программа нагружения с учетом истории нагружения, а затем программа нагружения может быть скорректирована с учетом связи напряженного и деформированного состояний, а также сложного характера изменения напряженного состояния в каждом цикле.

6. Итеративным путем может быть уточнена зависимость размаха пластической деформации в цикле от истории нагружения.

Будем полагать, что характер накопления деформаций в процессе усталостного нагружения идентичен характеру накопления деформаций при механической обработке. Примем общий вид программы усталостного нагружения:

$$\Lambda = \Lambda_0 + \frac{a}{\left(exp\left(-b\overline{\Pi}^c\right)\right)^d}, \qquad (2.28)$$

где Λ_{θ} - деформация, накопленная на предшествующих стадиях нагружения. Второе слагаемое правой части выражения (2.28) представляет собой описание искомой программы усталостного нагружения.

Для построения моделей программ нагружения требуются зависимости средних (в цикле) значений показателей схемы напряженного состояния от числа циклов нагружения до появления усталостной трещины. В таблице 2.10 приведены коэффициенты моделей, построенных по формуле 2.28.

№ серии	$\overline{\Pi}_{ heta}$	b	С
1	-0,827	0,0000764	0,646
2	-0,82	0,00417	0,357
3	-0,67	0,00669	0,312
4	-0,686	0,00391	0,344
5	-0,599	0,0172	0,256
6	-0,535	0,00281	0,385
7	-0,57	0,0128	0,283

Коэффициенты зависимостей среднего (в цикле) значения показателя схемы напряженного состояния от числа циклов до появления усталостной трещины

Рассмотрим основные закономерности на примере 1 выборки. Для получения программы нагружения требуется определить зависимость накопленной степени деформации сдвига от количества циклов нагружения. Для этого воспользуемся методом нормирования числа циклов относительно максимального значения (циклической долговечности):

$$[N] = \frac{N}{N_{\mu,\delta}}.$$
 (2.29)

После ряда преобразований, получили зависимость нормированного числа циклов от среднего значения показателя схемы:

$$[N] = 2,1 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - \theta, 621\right)^2}{\theta, 5}\right).$$
(2.30)

Рассчитаем нормированные значения числа циклов по данной модели при изменении показателя схемы в известном интервале. Как следует из таблицы 2.9, на стадиях резания и ППД накопленная степень деформации сдвига на поверхности составляет $\Lambda = 0,46$. В точке вероятного разрушения на глубине h = 0,274 мм в соответствии с распределением (2.26) степень деформации сдвига составляет $\Lambda = 0,42$. Кроме того, ранее, на основе анализа напряженного состояния было установлено, что в момент нарушения сплошности материала показатель схемы составляет $\Pi = \pm 0,577$, т.е. $\overline{\Pi} = 0$. В соответствии с диаграммой пластичности, при $\Pi = 0$, $\Lambda_n = 1,232$. Полагая, что характер накопления деформаций в зависимости от показателя схемы идентичен характеру зависимости числа циклов от показателя схемы, рассчитанные нормированные значения числа циклов умножили на $(\Lambda_p - \Lambda_0) = 1,232 - 0,42$ и получили расчетные значения степени деформации сдвига, накопленные в течение усталостного нагружения. По расчетным данным построили модель программы нагружения для 1-ой выборки:

$$\Lambda = \theta, 42 + 1,72 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - \theta, 63\right)^2}{\theta, 5}\right).$$
(2.31)

На рис. 2.26 показана программа нагружения на стадии циклической долговечности для 1-ой выборки в категориях показателя схемы и степени деформации сдвига. Модель (2.32) получена в предположении о неизменном в течение цикла показателе схемы. Реально, как было установлено, показатель схемы от 2 до 5 раз меняет свое значение и (или) знак в течение одного цикла в зависимости от истории нагружения. С учетом сказанного, модель программы нагружения может быть представлена в виде, показанном на рис. 2.27.

Из рис. 2.27 видно, что реальная программа нагружения представляет собой ступенчатую ломаную линию, описывающую изменение показателя схемы в каждом цикле, и накопление деформации в зависимости от этого изменения. По мере накопления деформаций и релаксации остаточных напряжений размах показателя схемы в цикле возрастает.

Отметим, что такой вид программы нагружения обусловлен принятыми ранее допущениями, в том числе, и о характере релаксации остаточного напряженного состояния. По всей видимости, история нагружения, определяя накопленные (наследуемые) свойства, определит и вид программы нагружения на стадии циклической долговечности.



Рис. 2.26. Программа нагружения стадии циклической долговечности для 1 выборки с учетом наследственной деформации

Проведем оценку выполнимости соотношения между пластической деформацией в цикле и циклической долговечностью. Если воспользоваться уравнением для малоцикловой усталости в виде [22]

$$\Delta \Lambda = \frac{\Lambda_p}{\left(2N_p\right)^{0.5}},\tag{2.32}$$

то после подстановки получим: $\Delta \Lambda = \frac{1,232}{(2 * 2050000)^{0,5}} = 0,000494$.

Однако, как было отмечено ранее, существуют определенные отличия в накоплении деформаций при мало- и многоцикловой усталости. Если полагать, что справедливы соотношения, полученные В.Л. Колмогоровым с сотрудниками применительно к процессу многоцикловой усталости, то [22]:

$$\Delta A N_{\mu,\partial}^{\nu} = B , \qquad (2.33)$$

где $\Delta \Lambda$ - размах степени неупругой деформации (степени деформации сдвига), накопленной на участке знакопостоянной деформации, в одном цикле; $N_{u.d.}$ - циклическая долговечность; v и **B** - коэффициенты, имеющие

тот же смысл, что и в уравнении Коффина - Менсона. Применительно к стали 45 уравнение (2.33) принимает вид:

$$\Delta A N^{0,72} = 3,62, \qquad (2.34)$$

откуда $\Delta \Lambda = \frac{3,62}{2050000^{0,72}} = 0,000103$.





знака цикла: 1-2 – программы нагружения при отрицательном и положительном значении напряжения цикла; 3 – программа нагружения при среднем в цикле показателе схемы; 4 – ступенчатая программа нагружения при изменении напряжений цикла от положительного до отрицательного

значения

Полученное значение почти в 5 раз меньше рассчитанного по уравнению Коффина - Менсона.

Представленный подход к оценке деформированного состояния позволяет получить наследственные модели накопления деформаций на стадии циклического нагружения в зависимости от числа циклов. Так, по

модели (2.31) был проведен расчет мгновенной степени деформации сдвига, накапливаемой в каждом цикле (рис. 2.28), и суммарной степени деформации сдвига (рис. 2.29).

Интересно, что наиболее интенсивное накопление деформаций происходит при числе циклов $N_{u.o.} = 20000 - 25000$ и $N_{u.o.} = 600000 - 1000000$. В первом случае, это связано с резким изменением значения показателя схемы в сторону положительных значений, во втором - с историей нагружения, т.к. именно в этот период происходит наиболее интенсивная релаксация остаточного (наследственного) напряженного состояния. Что касается накопленной степени деформации сдвига, то, как и предполагалось, зависимость от числа циклов усталостного нагружения близка к линейной.



Рис. 2.28. Зависимость мгновенной степени деформации сдвига от числа циклов усталостного нагружения



Рис. 2.29. Зависимость накопленной степени деформации сдвига от числа циклов усталостного нагружения

В соответствии с данной методикой были рассчитаны программы нагружения для всех 7 выборок усталостного нагружения (рис. 2.30 и таблица 2.11).

Накопление деформации на ранних этапах усталостного нагружения происходит по различным ПН в зависимости от истории нагружения. После накопления 80-85% от предельной деформации ПН для всех выборок практически совпадают. Огибающая линия стартовых значений программ усталостного нагружения описывается уравнением:

$$\Lambda = \theta, 4 + 21, 6 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - \theta, 6\right)^2}{\theta, 35}\right).$$
(2.35)

История нагружения влияет на скорость накопления деформаций. Анализ показывает, что с увеличением наследственной деформации область программ усталостного нагружения сужается, что выражается в более пологом характере, меньшей накопленной на стадии циклической долговечности деформации при большей скорости изменения показателя

напряженного состояния в каждом цикле и смещении всей ПН в область более "жестких" значений. Отсутствие начального упрочнения приводит к "жесткой" схеме нагружения при меньшей циклической долговечности изделия (рис. 2.31).

Таблица 2.11

Программы нагружения стадии циклической долговечности с учетом наследственной деформации по среднему значению показателя схемы в

№ выборки	Модель программы нагружения
1	$\Lambda = 0,42 + 1,72 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - 0,63\right)^2}{0,5}\right)$
2	$\Lambda = 0,546 + 1,075 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - \theta, 4\right)^2}{\theta,335}\right)$
3	$\Lambda = \theta,53 + 4,0 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - \theta,79\right)^2}{\theta,35}\right)$
4	$\Lambda = 0,586 + 3,49 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - 0,75\right)^2}{0,325}\right)$
5	$\Lambda = 0,793 + 5,026 \exp\left(-\frac{(\overline{\Pi} - 0,67)^2}{0,18}\right)$
6	$\Lambda = 0,888 + 561,5 \exp\left(-\frac{(\overline{\Pi} - 1,41)^2}{0,26}\right)$
7	$\Lambda = \theta, 902 + 6, 97 \exp\left(-\frac{\left(\overline{\Pi} - \theta, 8\right)^2}{\theta, 2}\right)$

цикле



Рис. 2.30. Программы нагружения усталостной стадии при средних значениях показателя схемы в каждом цикле с учетом наследственной деформации: 1-7 – номер выборки: 8 – огибающая линия стартовых значений программ нагружения; 0 – материал образца в исходном состоянии (без упрочнения)



Рис. 2.31. Границы областей программ нагружения на стадии циклической долговечности: цифрами 1, 7 и 0 обозначены области программ усталостного нагружения для соответствующей выборки при максимальном, минимальном и среднем значении напряжений цикла



Рис. 2.32. Зависимости приращений степени деформаций сдвига от количества циклов усталостного нагружения



Рис. 2.33. Зависимости накопленной степени деформации сдвига от числа циклов усталостного нагружения: цифрами обозначены номера выборок



Рис. 2.34. Зависимость приращения степени деформации сдвига в одном цикле на стадии циклической долговечности от продолжительности этой стадии

Кроме того, увеличение уровня наследственной деформации приводит к тому, что программа усталостного нагружения стартует с более "жестких" схем. Это еще раз говорит о едином характере влияния истории нагружения на последующее накопление деформаций независимо от метода воздействия на поверхностный слой изделия (резание, ППД, циклическое нагружение): чем больше наследуемая деформация, тем в большей мере программа нагружения на последующей стадии смещается в область более "жестких" значений.

Технологическое наследование в категориях механики выражается и в том, что уровень мгновенных деформаций по мере циклирования различен (рис. 2.32). Видно, что наибольший прирост деформаций характерен для 1 выборки в районе $N_{u.o.} = 600000 - 1000000$. Увеличение уровня наследственной деформации (выборки 2-4) приводит к уменьшению абсолютных мгновенных значений деформации и смещению их в область циклов N = 1200000 - 2500000. Дальнейшее увеличение уровня накопленной деформации еще более снижает

уровень абсолютных мгновенных значений деформации и смещает их в область меньших циклов нагружения *N* = *2400000* – *1700000* (5-7 выборки).

В конечном итоге, история нагружения определяет и общий характер накопления деформации на стадии циклической долговечности (рис. 2.33 -2.34). Чем больше наследственная деформация, тем меньше накапливаемая деформация на стадии циклической долговечности и тем меньше приращение степени деформации в одном цикле нагружения.

Рассмотрим цикличность накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности для 1 выборки:

 Для наиболее характерных циклов нагружения, к которым отнесли 1, 118490, 820000, 1435000, 1845000, 2047000 циклы;

• В выбранных циклах-в зависимости от цикличности приложения внешней нагрузки и релаксации напряжений;

• Для принятых в моделях усредненных (среднеарифметических) значений показателя схемы в циклах, рассчитанных по максимальному и минимальному значению.

Накопленная в цикле степень деформации сдвига определяется установленной программой нагружения, причем не является постоянной и изменяется в зависимости от истории (в том числе, усталостного) нагружения. В пределах каждого цикла от 2 до 5 раз происходит нарушение монотонности накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности.

Исходными данными для расчетов степени деформации сдвига и исчерпания запаса пластичности на стадии циклической долговечности являлись наследственные параметры напряжений и деформаций после стадий резания и ППД (таблица 2.12).

Исходные данные для расчетов исчерпания запаса пластичности на стадии

No	Стадия		Стадия ППД		Механическая	
ыборки	резания				обработка	
	Λ	Ψ	Λ	Ψ	Λ	Ψ
1		0,13 6	0,249	0,34	0,419	0,476
2			0,376	0,44	0,546	0,576
3			0,36	0,43	0,530	0,566
4	0,17		0,416	0,48	0,586	0,616
5			0,623	0,643	0,793	0,779
6			0,718	0,72	0,888	0,856
7			0,732	0,732	0,902	0,868

циклической долговечности в точках вероятного разрушения

Условно приняли, что выделенные циклы (этапы) нагружения осуществляются в идентичные периоды времени. При оценке приращения деформаций предполагали, что в каждом цикле в каждый выделенный период Δt происходит накопление деформаций равными долями.

В таблице 2.13 приведены численные значения деформационных параметров в выбранных циклах усталостного нагружения, рассчитанные с учетом истории процесса пластической деформации в точке вероятного разрушения.

Таблица 2.13

№ цикла	$\Delta \Lambda$	$\Delta \Psi$
1	0,012558	0,00612
118490	0,000000132	0,000000626
820000	0,000000478	0,00000218
1435000	0,00000398	0,00000163
1845000	0,000000305	0,000000174
2047950	0,00000133	0,00000078

Деформационные параметры в точках вероятного разрушения для 1 выборки

Из таблицы 2.13 видно, что наибольший прирост степени деформации сдвига и СИЗП имеет место в первом цикле нагружения. Это связано с тем, что в начальных циклах происходит наиболее интенсивная релаксация остаточных напряжений, повышающая "жесткость" схемы нагружения. В

районе 100000–300000 циклов и в конце стадии циклической долговечности прирост анализируемых параметров $\Delta \Lambda$ и $\Delta \Psi$ наименьший. В течение 300000-2000000 циклов в каждом цикле накапливается в среднем $\Delta \Lambda \approx 4,0 \times 10^{-7}$ и $\Delta \Psi \approx 2,0 \times 10^{-7}$.

Анализ рис. 2.35 - 2.39 показывает, что программы нагружения в пределах каждого из выбранных циклов имеют весьма сложный вид, когда изменяется как форма зависимости " $\Pi - \Lambda$ ", так и ее положение в выбранной системе координат. Видно, что в 1 цикле монотонность накопления деформаций нарушается 4 раза, в 118490 цикле – 5 раз, в 820000 цикле – также 5 раз. Все это обусловлено сложной историей, в том числе циклического нагружения, следствием которой является ранее описанный сложный характер распределения напряжений и деформаций, как по глубине поверхностного слоя, так и в пределах всей детали.

Аналогичные исследования проведены для 2-7 выборок, которые показали, что программы нагружения и степень исчерпания запаса пластичности в пределах отдельных рассматриваемых циклов зависят от истории нагружения. В качестве примера на рис. 2.39 показана программа нагружения в точке вероятного разрушения для 3 выборки. Видно, что программа нагружения для 1 цикла отличается от аналога для 1 выборки, что является следствием влияния истории нагружения.

Кроме того, было установлено, что история нагружения влияет на приращение степени деформации и СИЗП в цикле, суммарные деформационные показатели циклического нагружения, продолжительность стадии циклической долговечности. Например, из таблицы 2.14 видно, что в среднем в каждом цикле накапливается $\Delta \Lambda \approx 1,5 \cdot 10^{-8}$ и $\Delta \Psi \approx 6,0 \cdot 10^{-8}$. Исключение составляют начальные и заключительные циклы перед полным исчерпанием запаса пластичности. Таким образом, прирост деформации в среднем в 2,7 раз, а СИЗП в 3,3 раза в 1 выборке больше, чем в третьей.

К числу установленных наследственных закономерностей усталостного нагружения можно отнести:

- Характер изменения напряженного и деформированного состояния поверхностного слоя в каждом цикле и в течение всего усталостного нагружения.
- Численные значения приращения степени деформации сдвига и степени исчерпания запаса пластичности поверхностным слоем детали в каждом цикле.
- Программы нагружения поверхностного слоя в каждом цикле нагружения и характер исчерпания запаса пластичности поверхностным слоем в каждом цикле с учетом истории нагружения.
- 4. Роль истории нагружения поверхностного слоя в обеспечении циклической долговечности детали.

На рис. 2.40 представлены зависимости степени исчерпания запаса пластичности от наследственной и накапливаемой степени деформации сдвига на стадии циклической долговечности для 1-7 выборок.

Несмотря на то, что история нагружения оказывает влияние на долговечность и скорость накопления деформаций в каждом цикле, тем не менее, процесс исчерпания запаса пластичности подчиняется общим с механической обработкой закономерностям. На рис. 2.41 показаны итоговые результаты нагружения поверхностного слоя на стадиях механической обработки (резания ППД) и усталостного И нагружения ДЛЯ всех рассматриваемых в данной работе выборок. Представленная модель объясняет 0,963 всей дисперсии при коэффициенте корреляции 0,982.



Рис. 2.35. Программа нагружения для 1 выборки в первом цикле с учетом истории нагружения



Рис. 2.36. Программа нагружения для 1 выборки в 118490 цикле с учетом истории нагружения



Рис. 2.37. Программа нагружения для 1 выборки в 820000 цикле с учетом истории нагружения



Рис. 2.38. Программа нагружения для 1 выборки в 1845000 цикле с учетом истории нагружения



Рис. 2.39. Программа нагружения для 3 выборки в первом цикле с учетом

истории нагружения

Таблица 2.14

Деформационные параметры в точках вероятного разрушения для 3 выборки

№ цикла	$\Delta \Lambda$	$\Delta \Psi$
1	0,00178	0,000848
2053333	0,00000162	0,000000797
3593333	0,00000133	0,000000720
4620000	0,00000102	0,0000000592
5128200	0,000000405	0,000000239
205333	0,0000000192	0,0000000924

В заключение данного раздела отметим, что разработанная методика расчета деформационных параметров на стадии циклической долговечности с учетом истории нагружения показала высокую достоверность (таблица 2.15).

Так среднее квадратическое отклонение показателя полного исчерпания запаса пластичности не превышает 0,068, а медианное значение этого показателя составляет 1,009.



Рис. 2.40. Зависимость степени исчерпания запаса пластичности от наследственной и накапливаемой деформации сдвига на стадии циклической долговечности: цифрами обозначены номера выборок

Таблица 2.15

Результаты нагружения поверхностного слоя в точках вероятного разрушения на стадиях резания, ППД и циклической долговечности

<u>№</u> выборки	Механ обра	Механическая обработка		Усталостное нагружение		Деформированное состояние в конце стадии циклической долговечности	
	Λ	Ψ	Λ	Ψ	Λ	Ψ	
1	0,419	0,476	0,786	0,641	1,205	1,117	
2	0,546	0,576	0,666	0,346	1,212	0,922	
3	0,530	0,566	0,675	0,369	1,205	0,935	
4	0,586	0,616	0,628	0,340	1,214	0,956	
5	0,793	0,779	0,422	0,230	1,215	1,009	
6	0,888	0,856	0,311	0,171	1,199	1,027	
7	0,902	0,868	0,305	0,165	1,207	1,033	



Рис. 2.41. Наследственная зависимость степени исчерпания запаса пластичности от степени деформации сдвига для стадий резания, ППД и циклической долговечности

3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА СТАДИЯХ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1. Закономерности формирования остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки

3.1.1. Постановка задачи моделирования остаточных напряжений

Известно, что остаточные напряжения (OH) являются одним из ключевых параметров качества поверхностного слоя (ПС) ответственных деталей машин при различных видах циклических знакопеременных эксплуатационных нагрузок; при этом важную роль играет как величина, так и характер распределения сжимающих OH по глубине ПС.

Широкими возможностями по созданию в ПС благоприятных сжимающих ОН близких по величине к пределу текучести металла обладают способы упрочняющей обработки (УО) поверхностным пластическим деформированием (ППД) (рис. 1), которые позволяют в широком диапазоне регулировать шероховатость поверхности Ra от 0,04 до 0,8 мкм, глубину упрочнения h в пределах от 0,5 до 5 мм, степень упрочнения δ от 17 до 50% и др. [3].

Кроме того, при УО ППД в ПС отсутствуют термические дефекты, сохраняется целостность волокон металла, несколько раз за один рабочий ход уменьшается шероховатость поверхности, возникает деформационное упрочнение поверхностного слоя, что в итоге приводит к повышению прочности и долговечности деталей при знакопеременных нагрузках в 5 и более раз.

При УО ППД в зоне контакта деформирующих инструментов с деталью возникает асимметричный очаг деформации (ОД) *ABCDEFG*, характеризуемый линиями контура передней внеконтактной *ABC*, передней

контактной *CD*, задней контактной *DE* и задней внеконтактной *EF* поверхностей, а также линией *FGA*, описывающей границу зоны пластического течения металла. Вследствие деформации частицы металла вдоль линий тока (рис. 3.1) смещаются в зоне волнообразования, формируя ПС детали. Начальные параметры состояния, которые частицы металла имели до входа в очаг деформации (линия *AG*), трансформируются в накопленные к моменту их выхода из ОД (линия *GF*).



Рис. 3.1. Схема очага деформации в плоскости подачи при обработке ППД

Для раскрытия возможностей Ппд по обеспечению долговечности деталей машин необходимы знания физических закономерностей формирования поверхностного слоя и, в частности, остаточных напряжений.

Адаптированным для решения такого класса задач является аппарат механики технологического наследования состояния поверхностного слоя,

позволяющий описать в единых терминах и категориях физическую природу поведения металла на стадиях жизненного цикла и привести результаты исследований к форме, удобной для инженерного пользования [3]. В качестве накопленных параметров, наряду с традиционными параметрами качества ПС, используются степень деформации сдвига Λ , степень исчерпания запаса пластичности (СИЗП) Ψ и компоненты тензора остаточных напряжений [$T\sigma_{acm}$].

К настоящему времени известно и используется значительное число методик исследования остаточных напряжений, большая часть из которых предполагает экспериментальное определение путем послойного удаления поверхностного слоя металла детали и измерение остаточных деформаций с последующим расчетом величины ОН. При этом большинство методик являются трудоемкими и не позволяют оперативно определять распределение он, точность таких методик, как правило, невысока.

Учитывая перспективным сказанное, направлением является разработка расчетного аппарата, позволяющего прогнозировать формирование OH упрочняющей обработки без после проведения трудоемких экспериментальных исследований.

Для разработки расчетного аппарата было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) очага деформации методом конечных элементов и выполнены расчеты остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя детали для способов упрочняющей обработки ППД и размерным совмещенным обкатыванием (РСО).

Моделирование осуществлялось плоско-деформированной В постановке, в соответствии в упруго-пластическое тело в виде пластины (обрабатываемая деталь) на величину натяга внедрялся абсолютно жесткий индентор – ролик с профильным радиусом R_{nn} (рис. 3.2). Верхняя граница модели обрабатываемой детали представляла собой контур очага деформации, а нижняя – жестко закреплялась по обеим осям. Индентору придавалось смещение по оси *x* на величину подачи *S*.



Рис. 3.2. Постановка задачи моделирования остаточных напряжений (ОН). Схема расположения характерных точек и распределения компонент тензора

ОН по глубине поверхностного слоя

Использование плоско-деформированной постановки предполагает, что деформационные процессы в ОД происходят только в рассматриваемой плоскости, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки (плоскости подачи), а тензор напряжений является условно объемным [2].

Начальными и граничными условиями для моделирования являлись:

1. Физические и механические свойства металла: сталь 45 ГОСТ 1050-88; плотность ρ =7800 кг/м³; коэффициент Пуассона v =0,3; коэффициент трения η =0,21; относительный коэффициент линейного теплового расширения α =12 x 10⁻⁶ 1/⁰C.

2. Кривая течения металла, представленная виле функции В $\sigma_i = 360 + 865, 6 \cdot e_i^{0.57}$, где e_i – интенсивность логарифмической деформации; σ_i – интенсивность напряжений. В процессе исследований использовалась билинейная аппроксимация кривой течения, для описания которой необходимо знать три параметра: модуль Юнга *E* = 2 х 10¹¹ МПа, характеризующий угол наклона упругого участка α ; экстраполированный предел текучести $\sigma_{m} = 3,66 \times 10^8$ МПа, соответствующий отрезку на оси напряжений, определяемому продолжением участка пластического течения; тангенциальный модуль $T_{MOQ} = 2,596 \times 10^6$ МПа, характеризующий угол наклона участка пластического течения β .

3. Режим УО.

4. Форма и геометрические размеры ОД, которые определялись на основе обработки большого количества экспериментальных данных и базы профилограмм ОД при ППД.

Согласно теореме о разгрузке тензор остаточных напряжений представляет собой разность напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложении нагрузки $[T\sigma_{oe\phi}]$, и напряжений, которые возникали бы в идеально упругом теле при идентичном нагружении $[T\sigma_{pas}]$, суммированную с напряжениями упругой разгрузки при

раскреплении детали [*Т* $\sigma_{packp.dem.}$] и упругими тепловыми напряжениями разгрузки [*Т* $\sigma_{,0}$] [27]:

$$[T\sigma_{ocm}]_{PCO} = [T\sigma_{\partial e\phi}]_{PCO} - [T\sigma_{pas}]_{PCO} + [T\sigma_{pac\kappa p, \partial em}]_{PCO} + [T\sigma_{t^0}]_{PCO}.$$
(3.1)

При моделировании были приняты следующие допущения:

1. Тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали был принят нулевым, поскольку на всех этапах выполнялся ряд условий, указанных А.Н. Овсеенко для обработки симметричных деталей [27].

2. Материал детали при изменении температуры проявляет линейные изотропные свойства, а возникающие тепловые деформации носят упругий характер.

3. Источником тепла является поверхностный слой, испытывающий пластическую деформацию.

4. Деталь имеет значительную по сравнению с очагом деформации длину, а нагреву подвергается та часть поверхностного слоя детали, которая находится в данный момент в контакте с инструментом.

5. Остаточные напряжения от механического воздействия формируются в зоне контакта с инструментом, имеющей отличную от остальной детали температуру.

6. Деталь, нагреваясь во время обработки, создает тепловые напряжения в направлении оси *x*, а в направлении оси *y* свободно расширяется, не создавая каких-либо напряжений.

7. Касательные напряжения не возникают, поскольку тепловое расширение носит линейный изотропный характер.

Таким образом, для плоско-деформированной постановки имеем:

$$[T\sigma_{ocm}]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{\partial e\phi} - \sigma_x^{pas} - \sigma_x^{t^0} & \sigma_{xy}^{\partial e\phi} - \sigma_{xy}^{pas} & 0 \\ \sigma_{xy}^{\partial e\phi} - \sigma_{xy}^{pas} & \sigma_y^{\partial e\phi} - \sigma_y^{pas} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\sigma_x^{\partial e\phi} + \sigma_y^{\partial e\phi}) - (\sigma_x^{pas} + \sigma_y^{pas}) - \sigma_x^{t^0}}{2} \end{pmatrix}.$$
 (3.2)

Решение задачи моделирования остаточных напряжений осуществлялось поэтапно, при этом, в соответствии с теоремой о разгрузке, каждая составляющая тензора моделировалась отдельно:

1) тензор напряжений под нагрузкой ([$T\sigma_{de\phi}$]);

2) тензор упругих напряжений разгрузки ([$T\sigma_{pas}$]);

3) тензор упругих тепловых напряжений разгрузки ([$T\sigma_{,0}$]).

4) тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали

 $([T\sigma_{packp.dem.}]).$

Принятая постановка задачи предполагала создание отдельных для каждого этапа геометрически идентичных конечно-элементных моделей, состоящих из обрабатываемой детали и ролика.

При определении тепловых напряжений разгрузки (3-его этапа моделирования ОН) было принято, что они возникают по причине остывания поверхностного слоя детали, нагретого в момент обработки до определенной температуры.

Значения температуры на поверхности детали после обработки определялись на основе расчетно-экспериментальной модели, полученной для способов ППД В.М. Смелянским и учениками [1,29]. Согласно этим исследованиям, подавляющая часть тепла вызвана работой пластической деформации в поверхностном слое, и лишь небольшая доля вызвана трением на контакте деформирующего инструмента с деталью.

При этом авторы указывают, что превалирующее влияние на температуру поверхности детали оказывают расчетный натяг (сумма действительного натяга h_{∂} и высоты волны h_{e}) и профильный радиус ролика. Отмечено также некоторое влияние подачи, с увеличением которой t возрастает. Рост h_{p} вызывает увеличение температуры поверхности, а увеличение r_{np} , напротив приводит к ее уменьшению [1,29]:

$$t = h_p \cdot (279 - 18, 4 \cdot R_{np}) - 3, 6 \cdot R_{np} + 78, 8.$$
(3.3)

Для удобства в расчетах поверхность детали при моделировании подвергалась нагреву, а не охлаждению, как это имеет место в реальном процессе. Поэтому, при описанном ниже суммировании с остальными составляющими, значения тензора тепловых напряжений разгрузки также принимались с противоположным знаком.

Тензор ОН окончательно формируется на выходе частицы из очага деформации, поскольку при каждом новом обороте детали эти частицы более не попадают в зону деформации. В связи с этим, из множества узлов конечно-элементной модели, содержащих значения тензора ОН, необходимо выбрать узлы, расположенные на задней границе ОД по глубине поверхностного слоя (траектория FG на рис. 3.3), при этом точка F на обработанной поверхности соответствует окончанию зоны упругопластического восстановления металла за инструментом.

Предварительное моделирование позволило выявить закономерность, расположения задней границы ОД от профильного радиуса ролика (рис. 3.4). С увеличением *R_{np}* задняя граница ОД (траектория *FG* на рис. 3.3) смещается по оси абсцисс противоположно направлению подачи.

В результате КЭ-моделирования были получены распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя для способов УО ППД и РСО. Рассмотрим особенности его формирования на примере осевых напряжений (σ_x) (рис. 3.5).

Установлено, что максимальные значения сжимающих начальных напряжений приходятся на поверхность детали. На некоторой глубине происходит переход в область положительных (растягивающих) значений, затем наблюдается максимум растягивающих напряжений, после которого, по мере продвижения вглубь поверхностного слоя, значения начальных напряжений приближаются к нулю.



Рис. 3.3. Траектория определения эпюры остаточных напряжений



Рис. 3.4. Зависимость расположения задней границы ОД от профильного радиуса ролика

Величина и глубина распространения упругих тепловых напряжений разгрузки зависит от температуры поверхности после обработки, которая

зависит, в свою очередь, от основных параметров режима обработки – натяга и профильного радиуса ролика.



Рис. 3.5. Распределение составляющих тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя (компонент *σ*_x): 1 – начальные напряжения (без учета тепловой разгрузки); 2 – напряжения тепловой разгрузки;

3 – результирующие напряжения (с учетом тепловой разгрузки);

Глубина распространения тепловых напряжений $[T\sigma_{t^0}]$ невелика и при максимальных значениях параметров режимов не превышает 2 - 3 мм, однако, при этом, осевые напряжения на поверхности детали достигают значений, близких к пределу текучести металла.

В результате воздействия напряжений тепловой разгрузки значение экстремума итоговой эпюры ОН существенно снижается, а сам экстремум одновременно смещается в глубину поверхностного слоя (рис. 3.5).

Для выявления взаимосвязей полученного тензора ОН с технологическими режимами ППД на эпюре каждой компоненты тензора были выделены характерные точки, абсциссы которых являлись собственно

значениями соответствующих компонент, а ординаты – глубинами расположения точки от поверхности детали (рис. 3.2). В качестве характерных точек для каждой компоненты ОН были приняты:

1. Значение напряжений на поверхности детали (точка A) - σ_A ;

2. Значение напряжений в первом экстремуме (точка *B*) - σ_{B} ;

3. Глубина расположения первого экстремума (точка *B*) - $h\sigma_B$;

4. Глубина распространения сжимающих напряжений (точка C) - $h\sigma_0$;

5. Значение напряжений во втором экстремуме (точка D) - σ_D ;

6. Глубина расположения второго экстремума (точка *D*) - $h\sigma_{D}$;

7. Глубина затухания (точка E) - $h\sigma_{ocm}$.

По данным А.В. Журавлева и В.Ю. Блюменштейна для случая обработки ППД наибольшее влияние на циклическую долговечность имеет распределение напряжений в тонком поверхностном слое толщиной *1-2 мм*, а значения на больших глубинах не оказывают существенного влияния на данное эксплуатационное свойство детали [1,3].

Поскольку глубина распространения сжимающих напряжений $h\sigma_0$ в подавляющем большинстве случаев превышала 2 *мм*, значения компонент остаточных напряжений и глубин их залегания в дальнейшем рассматривались в характерных точках *A*, *B* и *C* (рис. 4.19).

По данным В.Ю. Блюменштейна, основное влияние на величину и глубину распространения в частности окружных остаточных напряжений оказывают влияние натяг h_p (для РСО) и h_o (для ППД) и профильный радиус r_{np} , а также действительный зазор a_o (для РСО). Эти факторы и были выбраны в качестве варьируемых при определении взаимосвязей.

В ряде случаев характерные точки b и c на эпюрах σ_y и σ_{xy} отсутствовали: эпюры этих компонент он имели лишь характерные точки a, d и e.

3.1.2. Аналитическое описание взаимосвязей компонент тензора остаточных напряжений с режимами упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

Отметим некоторые особенности результирующего тензора ОН при ППД (рис. 3.6):

1. Воздействие напряжений тепловой разгрузки в значительной степени уменьшает численные значения экстремума остаточных напряжений на поверхности детали и смещает его в глубину поверхностного слоя.

2. Наибольшими сжимаюшими значениями напряжений характеризуется осевой компонент σ_x , который на поверхности детали в зависимости от режима обработки изменяется в диапазоне от -700 до 200 наблюдаются МПа. Положительные значения при малых значениях профильного соответствует радиуса ролика, что современным представлениям о том, что деформирующий инструмент малого профильного радиуса, к которым относится большинство инструментов для резания, формирует на поверхности неблагоприятные растягивающие ОН.

Подповерхностный экстремум сжимающих осевых ОН не наблюдается, глубина распространения сжимающих ОН достигает 1 мм. Максимальные осевые растягивающие напряжения по глубине поверхностного слоя в зависимости от режимов обработки варьируют в пределах 100...1500 МПа, при глубине расположения -0,2...4,4 мм. Глубина распространения осевой составляющей в зависимости от режима достигает при этом 9 мм.

3. Компонент σ_y характеризуется меньшими, чем σ_x значениями при больших глубинах распространения. На поверхности σ_y принимает значения в диапазоне -400...300 МПа. Подповерхностный экстремум сжимающих значений σ_y также не наблюдается, а глубина распространения сжимающих ОН не велика (до 0,4 мм).

4. Распределение касательного компонента *σ_{xy}* характеризуется небольшими значениями напряжений. Первый экстремум, расположенный на

поверхности, в зависимости от режима имеет значения от -100 до 80 МПа. По мере удаления от поверхности в глубину обнаруживается второй экстремум, значения которого лежат в диапазоне $\sigma_{xy} = -1150...-80$ МПа, а глубина расположения достигает 2,4 мм.



Рис. 3.6. Распределение компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя ($R_{np} = 5$ мм, $h_o = 0.05$ мм)

5. Тензор ОН в целом характеризуется глубиной распространения сжимающих напряжений до 1 - 2 мм, а глубиной распространения до точки затухания свыше h = 10 мм.

Представленная картина формирования ОН хорошо согласуется с результатами Д.Д. Папшева, полученными для обработки ППД шариком. Автор подчеркивает возможность образования экстремума сжимающих ОН как на поверхности детали, так и на некоторой глубине в зависимости от степени воздействия тепловой разгрузки [28].

Полученные взаимосвязи объясняют не менее 91% дисперсии результатов при относительной погрешности определения не более 3% (табл. 3.1).

Взаимосвязи характерных точек компонент ОН с параметрами режима

	Параметры			Коэффициенты			
Вид функции	Функция (у)	Аргумен т (<i>x</i>)	Условия	а	Ь	С	
			$h_{o} = 0,03 \text{ MM}$	10,214	-158,79	403,58	
	– MITa		$h_{a} = 0,05 \text{ MM}$	22,029	-310,97	642,55	
	O_{xA} , IVII Ia	D	$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	52,256	-687,84	1206,73	
		Λ_{np} , MM	$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	8,267	-88,16	-485,3	
	σ ΜΠο		$h_{o} = 0,03 \text{ MM}$	19,07	-278,52	999,29	
	O_{xD} , MIIIa		$h_{\partial} = 0,05 \text{ mm}$	29,82	-441,97	1608,27	
			$R_{np} = 1,6$ MM	2,22e5	-29326,28	578,66	
		$h_{\!\scriptscriptstyle\partial}$, мм	$R_{np} = 3 \text{ MM}$	37484,72	-1183,86	29,66	
			$R_{np} = 5 \text{ MM}$	36669,43	-2850,45	62,22	
	$\sigma_{_{y\!A}}$, МПа		$h_{o} = 0,03 \text{ MM}$	-4,68	64,44	-170,2	
			$h_{o} = 0,05 \text{ MM}$	-14,67	201,07	-543,64	
$y = ax^2 + bx + c$		<i>К_{пр}</i> , ММ	$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	-45,03	568,43	-1176,53	
			$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	5,93	-119,39	592,49	
	$σ_{_{yD}}$, ΜΠα	<i>h_д</i> , мм	$R_{np} = 1,6 \text{ MM}$	2,87e6	-2,46	5694,15	
			$R_{np} = 3 \text{ MM}$	51870,38	13616,89	-26,5	
			$R_{np} = 5 \text{ MM}$	73690,07	5772,13	145,66	
			$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-20004,6	11774,37	-176,16	
		<i>R_{np}</i> , мм	$h_{o} = 0,03 \text{ MM}$	2,77	-47,2	116,73	
			$h_{o} = 0,05 \text{ MM}$	3,68	-54,95	49,45	
	σ_{zA} , MITA		$h_{_{\partial}} = 0,07 \text{ MM}$	3,61	-59,7	15,1	
			$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	7,1	-103,77	53,6	
		<i>h_{д,}</i> мм	$R_{np} = 1,6 \text{ MM}$	9,45e5	-65692,2	1747,54	
			$R_{np} = 3 \text{ MM}$	1,14e5	-2305,82	263,25	
			$R_{np} = 5 \text{ MM}$	83925,95	-2035,62	264,48	
	σ MΠ ₀		$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-37316,2	9700,82	-137,66	
	O_{zD} , with	<i>R_{пр}</i> , мм	$h_{\partial} = 0,03 \text{ MM}$	10,21	-172,35	827,63	
			$h_{\partial} = 0.05 \text{ mm}$	15,24	-236,66	1107,84	
			$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	88,52	-1196,34	3466,5	
			$h_{\partial} = 0,1$ мм	6,9	-191,51	1685,29	
Таблица 1 (продолжение)

	Парам	етры		Коэффициенты			
Вид функции	Функция (у)	Аргумен т (<i>x</i>)	Условия	а	b	С	
			$R_{np} = 1,6$ мм	-72382,8	7215,31	-100,31	
		$h_{\partial,MM}$	$R_{np} = 3 \text{ MM}$	-52541,2	6121,57	-202,86	
			$R_{np} = 5 \text{ MM}$	-13975,5	2552,69	-145,67	
	$\sigma_{_{xyA}},$		$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-24973,1	2399,11	-51,8	
	МПа		$h_{\partial} = 0,03 \text{ MM}$	7,12	-86,66	159,33	
			$h_{\partial} = 0,05 \text{ mm}$	6,26	-81,12	177,07	
			$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	6,36	-78,94	160,09	
			$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	-7,33	103,02	-362,06	
			$h_{\partial} = 0,03 \text{ MM}$	0,047	-1,031	-0,354	
$y = ax^2 + bx + c$	$h\sigma_{_{x\!E}}$, мм		$h_{\partial} = 0,05 \text{ MM}$	0,0975	-1,69	0,45	
		<i>R_{пр}</i> , мм	$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	0,194	-2,89	1,93	
	$h\sigma_{_{yD},}$ мм		$h_{\partial} = 0,03 \text{ MM}$	0,0074	-0,413	0,022	
			$h_{\partial} = 0,05 \text{ mm}$	0,0293	-0,611	0,593	
			$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	0,0238	-0,68	0,628	
			$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	-0,0343	0,074	-0,914	
	$h\sigma_{_{zD},}$ мм		$h_{o} = 0,03 \text{ MM}$	0,0304	-0,564	0,425	
			$h_{\partial} = 0,05 \text{ MM}$	0,0722	-1,1724	1,68	
			$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	-0,027	-0,16	0,126	
			$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	-0,1343	0,974	-2,314	
			$h_{\partial} = 0,03 \text{ MM}$	469,73	-546,44	-	
	$\sigma_{_{xyD}},$		$h_{\partial} = 0,05 \text{ mm}$	808,76	-987,09	-	
$y = a \cdot \lg(x) + b$	MITA		$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	1090,56	-1391,76	-	
			$h_{\partial} = 0,03 \text{ MM}$	-877,4	991,58	-	
	- ΜΠο	<i>R_{пр}</i> , мм	$h_{a} = 0,05 \text{ MM}$	-816,89	1181,13	-	
	O_{yD} , MIIIa		$h_{a} = 0,07 \text{ MM}$	-2344,43	2743,08	-	
			$h_{\partial} = 0,1$ мм	-2024,84	2840,42	-	
	$\sigma_{\scriptscriptstyle xD}$, МПа		$h_{\partial} = 0,07 \text{ MM}$	-1592,71	1689	-	
			$h_{\partial} = 0,1$ мм	-1771	2071,25	-	

Таблица 1 (окончание)

	п			Koadduuuauru				
	Парам	етры	N/	Коэффициенты				
Вид функции	Функция (у)	Аргумен т (<i>x</i>)	Условия	а	b	С		
			$R_{np} = 1,6 \text{ MM}$	1036,24	172,61	-		
	σ MΠα		$R_{np} = 3 \text{ MM}$	-9468,9	279,4	-		
	O_{xA} , wirita		$R_{np} = 5 \text{ MM}$	-8580,8	131,56	-		
			$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-5550,8	-8,34	-		
			$R_{np} = 1,6 \text{ MM}$	20620,17	53,06	-		
	σ ΜΠα		$R_{np} = 3 \text{ MM}$	15079,46	-325,48	-		
	O_{xD} , wind	h_{∂} , мм	$R_{np} = 5 \text{ MM}$	10311,04	-189,365	-		
			$R_{np} = 10 \text{ MM}$	2416,9	30,57	-		
	$\sigma_{_{y\!A}},$ МПа		$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-257,4	19,95	-		
			$R_{np} = 1,6 \text{ MM}$	-3003,65	126,82	-		
	$\sigma_{_{zA}},$ МПа		$R_{np} = 3 \text{ MM}$	-2865,34	86,47	-		
			$R_{np} = 5 \text{ MM}$	-3261,59	31,54	-		
			$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-2906,23	5,98	-		
$y = a \cdot x + b$				$R_{np} = 1,6 \text{ MM}$	-17286,6	59,73	-	
	_		$R_{np} = 3 \text{ MM}$	-14391	116,54	-		
	$\sigma_{_{xyD}}$, ΜΠα		$R_{np} = 5 \text{ MM}$	-12166,9	147,1	-		
			$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-6080,96	124,65	-		
		R_{np} , MM	$h_{\partial} = 0,1 \text{mm}$	116,54	-1660,22	-		
			$R_{np} = 1,6$ MM	-15	-1,05	-		
		k you	$R_{np} = 3 \text{ MM}$	-35,7	-2,62	-		
	$h\sigma_{_{x\!E}}$, мм	n_{∂} , with	$R_{np} = 5 \text{ MM}$	-41,92	-2,85	-		
			$R_{np} = 10 \text{ MM}$	-37,2	-4,93	-		
			$h_{\partial} = 0,1$ мм	-0,338	-5,24	-		
			$h_{\partial} = 0,03 \text{ MM}$	-0,243	0,142	-		
	$h\sigma_{mp}$ мм	<i>R_{пр}</i> , мм	$h_{\partial} = 0.05 \text{ mm}$	-0,142	-0,151	-		
	x_{xyD} , mm		$h_{\partial} = 0,07 \text{ mm}$	-0,143	-0,171	-		
			$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	-0,177	-0,005	-		

При увеличении действительного натяга h_{o} сжимающие осевые напряжения σ_x на поверхности детали увеличиваются (рис. 3.7, а), однако при малых значениях профильного радиуса ролика ($R_{np} = 1,6$ мм), происходит увеличение растягивающих осевых напряжений на поверхности. Взаимосвязь осевых ОН на поверхности с R_{np} обнаруживает экстремум и описана параболой (рис. 3.7, б), коэффициенты которой изменяются в зависимости от действительного натяга ролика. Наибольшие значения сжимающих ОН на поверхности наблюдаются при $R_{np} = 6,5...7$ мм.

Таким образом, для каждого профильного радиуса ролика существует оптимальный действительный натяг, обеспечивающий наибольшие осевые сжимающие напряжения на поверхности. Справедливо и обратное: для каждого действительного натяга существует оптимальный профильный радиус ролика, обеспечивающий наибольшие сжимающие напряжения σ_x .

При увеличении натяга величина растягивающих напряжений во втором экстремуме σ_{xD} возрастает, в то время как при увеличении R_{np} снижается (рис. 3.8).

Остальные нормальные компоненты остаточных напряжений ($\sigma_y u \sigma_z$) имеют похожую тенденцию изменения в зависимости от изменения варьируемых параметров режима. Эти и другие выявленные взаимосвязи координат характерных точек эпюр компонент остаточных напряжений представлены в таблице 3.1.



Рис. 3.7. Зависимости σ_x на поверхности от: а) действительного натяга h_{∂} ; б) профильного радиуса ролика R_{np}



Рис. 3.8. Зависимости σ_{xD} от: а) действительного натяга h_{∂} ; б) профильного радиуса ролика R_{nn}

Таким образом, в результате КЭ-моделирования выявлены взаимосвязи компонент тензора остаточных напряжений при ППД с основными параметрами режима обработки.

Анализируя полученные взаимосвязи и сравнивая их с результатами других авторов, можно отметить, что увеличение натяга при ППД приводит к увеличению глубины распространения сжимающих напряжений, увеличению сжимающих напряжений на поверхности детали, что соответствует данным, экспериментально полученным В.М. Смелянским и Ч.Н. Абсаром. По результатам исследований этих авторов величина осевых ОН при ППД достигает -800 МПа, а окружных напряжений – до -400 МПа [1,29].

Взаимосвязь сжимающих напряжений на поверхности с профильным радиусом ролика имеет вид параболы, которая в целом обнаруживает тенденцию к увеличению сжимающих ОН при увеличении R_{np} . В отдельных случаях обработки ППД величина осевых ОН приближается к пределу текучести металла.

В целом, полученные результаты соответствуют результатам работ [1,3,28-29]. Проведенный анализ показывает, что для получения больших значений и глубин распространения сжимающих напряжений, необходимо стремиться обрабатывать детали с большим натягом h_{α} и профильным

радиусом ролика. Однако, с увеличением указанных параметров режима, также будет возрастать неблагоприятное влияние тепловых напряжений разгрузки на поверхности детали.

На основе представленных моделей разработан алгоритм расчета тензора ОН при обработке ППД. Осуществляется его реализация в виде программного продукта, позволяющего прогнозировать распределение составляющих тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя в зависимости от технологических режимов обработки.

3.1.3. Аналитическое описание взаимосвязей компонент тензора остаточных напряжений с режимами упрочняющей обработки размерным совмещенным обкатыванием

Рассмотрим результирующие компоненты остаточных напряжений после РСО (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Распределения компонент тензора остаточных напряжений ($T\sigma_{ocm}$) по глубине поверхностного слоя

Наибольшими отрицательными значениями напряжений характеризуется осевой компонент σ_x . Этот факт является благоприятным, поскольку, по данным В.М. Смелянского, В.Ю. Блюменштейна, А.В. Журавлева и др. исследователей, именно осевые напряжения оказывают наибольшее влияние на циклическую долговечность детали при ее эксплуатационном (усталостном) нагружении [1].

Это объясняется тем, что сжимающие напряжения σ_x в поверхностном слое, суммируясь при эксплуатационном нагружении детали с неблагоприятными растягивающими напряжениями, взаимно компенсируют друг друга, снижая, тем самым, тензор действующих напряжений.

Распределение радиального компонента σ_y характеризуется значительно меньшими, чем σ_x значениями при тех же глубинах распространения. Ей свойственны меньшие перепады, как в область растягивающих, так и в область сжимающих значений. На поверхности детали σ_y имеет близкие к нулю значения.

Это соответствует данным В.М. Смелянского для ППД, согласно которым радиальный компонент ОН на поверхности равен нулю. По мнению автора, это не является существенным недостатком, поскольку радиальный компонент не оказывает значительного влияния на эксплуатационные характеристики детали [1,3].

В поверхностном слое толщиной *4-8 мм* сжимающие напряжения σ_y при РСО по абсолютным значениям не превышают *-100 МПа*.

Распределение касательного компонента σ_{xy} также характеризуется небольшими значениями напряжений. Первый экстремум, расположенный на расстоянии *0,5-1,5 мм* от поверхности имеет отрицательные значения напряжений (до *-100 МПа*). По мере удаления в глубину обнаруживается второй (положительный) экстремум, значения которого не превышают $\sigma_{xy} = 100 M\Pi a$.

Отличительной особенностью нормальных компонент тензора ОН при РСО является значительная (до *10 мм*) глубина распространения эпюры сжимающих напряжений. В целом глубина распространения компонент тензора ОН, при $D_{d} = 45..60 \text{ мм}$, достигает 25 мм.

Полученные результаты согласуются с результатами экспериментальных исследований РСО, где распределение тангенциальных ОН по глубине ПС имеет схожий характер и численные значения; при этом не было зафиксировано наличие второго (положительного) экстремума ОН [30].

Эпюры остаточных напряжений при обработке ППД, рассчитанные с помощью аналитической модели В.М. Смелянского и Ч.Н. Абсара, имеют схожий характер распределения и численные значения, однако характеризуются меньшей глубиной распространения, которая составляет в среднем около *1-3 мм* [1,29].

Моделирование ОН после РСО было проведено для образцов, обработанных с различными параметрами режима. Анализ показал, что, в целом, глубина распространения сжимающих напряжений компонент тензора лежит в диапазоне 2..5 *мм*, а в случаях обработки с натягами деформирующих инструментов $h_{\partial} = 0,8-0,9$ *мм* достигает величин в 9-10 *мм*.

Наибольшие численные значения имеет осевой компонент тензора ОН (σ_x). Согласно современным представлениям, именно осевые остаточные напряжения оказывают наибольшее влияние на циклическую долговечность детали при ее эксплуатационном (усталостном) нагружении по схеме изгиба с вращением [1,31]. Это объясняется тем, что сжимающие (отрицательные) значения σ_x на поверхности и в близлежащем слое, складываясь при эксплуатационном нагружении детали с неблагоприятными растягивающими напряжениями, взаимно компенсируют друг друга, снижая, тем самым тензор действующих эксплуатационных напряжений.

Анализ показал, что эпюра напряжений σ_y , действующих перпендикулярно оси детали, характеризуется более низкими по сравнению с

 σ_x значениями. Однако, глубина распространения сжимающих напряжений и глубина расположения подповерхностного экстремума имеют примерно такие же значения, как и в случае осевых напряжений.

Компонент σ_z в принятой плоско-деформированной постановке представляет собой полусумму двух рассмотренных выше нормальных компонент, т.е. распределение σ_z может быть восстановлено по распределению последних. По этой причине, зависимости расположения характерных точек σ_z от режимов обработки не рассматривались.

Выявлено, что эпюра касательного компонента σ_{xy} характеризуется невысокими значениями как положительных, так и отрицательных напряжений. Глубина распространения до первого нулевого значения при этом не превышает 6 *мм*.

Похожий характер распределения компонент имеет место при традиционном ППД, однако тензор ОН при РСО характеризуется большими (до *10 мм*) глубинами распространения сжимающих напряжений (против *2-3 мм* при ППД) [1,3].

Установлено, что рассмотренные компоненты ОН в наибольшей степени зависят от профильного радиуса ролика R_{np} и действительного натяга h_{∂} . Зафиксировано также незначительное влияние действительного зазора a_{∂} на некоторые составляющие тензора остаточных напряжений.

В результате анализа полученных данных были определены взаимосвязи координат характерных точек компонент ОН с основными обработки (табл. 3.2). Bce параметрами режима полученные И взаимосвязи, отсутствии представленные ниже при специальных 95% комментариев, объясняют не менее дисперсии результатов, относительная погрешность определения при этом не превышает 2%.

Взаимосвязи характерных точек компонент тензора ОН с параметрами

	Парам	етры		Коэффициенты			
Функция	Рассчитывае мый (у)	Варьируем ый (<i>x</i>)	Условия	а	b	С	
	$\sigma_{_{xA}, \text{ кгс/мм}^2}$ (х10 МПа)		$h_o < 0,24 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	-7,658	3,992	-26,933	
	σ _{<i>xB</i>,} кгс/мм ² (х10 МПа)	$h_{_\partial}$, мм	$R_{np} = 3 \text{MM}$	-5,061	3,744	-35,264	
	$h\sigma_{_{xB},}$ мм		-	-2,31	1,212	-3,829	
$y = \exp(a \cdot x + b) + c$	ha MM		$h_{\partial} = 0,1 \text{ mm}$	-0,527	1,887	-3,816	
	nO_{x0} , MM	R MM		-0,275	1,695	-6,822	
	σ_{yB} , кгс/мм ² (х10 МПа)	n_{np} , min	$h_{o} = 0,2 \text{ mm}$	-0,693	3,592	-9,026	
	ha ww	h_{∂} , mm	$R_{np} = 3 \text{ MM}$	-2,644	2,505	-12,318	
	nO_{y0} , MM	$R_{_{np}}$, MM		-1,053	4,923	-8	
	$\sigma_{_{xA}}$, кгс/мм ² (х10 МПа)	$h_{\partial}^{}$, мм	$h_{\partial} > 0,24 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	15,791	4,878	-	
	σ_{xB} , кгс/мм ²		$h_{\partial} = 0,1 \text{ mm}$	-7,862	2,211	-	
	(х10 МПа)		$h_{\partial} = 0,2 \text{ MM}$	-10,342	-7,753	-	
		\mathbf{n}_{np} , wim	$h_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$	-0,484	-0,31	-	
$y = a \cdot \ln(x) + b$	nO_{xB} , MM		$h_{o} = 0,2$ MM	-1,08	-0,295	-	
	σ_{yA} , кгс/мм ² (х10 МПа)	h sou	$P = 2 \log t$	1,588	3,824	-	
	σ_{yB} , кгс/мм ² (х10 МПа)	n_{∂} , MM	$\Lambda_{np} = 5 \text{ MM}$	-1,905	-7,277	-	
	$h\sigma_{xv0}$, MM R_{np} , MM			-0,332	-2,135	-	

режима

Таблица 3.2 (окончание)

	Парам	етры		Коэффициенты			
Функция	Рассчитывае	Варьируем	Условия	a	h	С	
	мый (у)	ый (x)		u	0		
	$σ_{xA}$, κγc/mm ²		$h_{\partial} = 0,1$ мм	0,308	-8,956	-8,612	
	(х10 МПа)	R_{m} , MM		0,936	-5,846	-22	
	σ_{yA} , кгс/мм ² (х10 МПа)	np y	$h_{\partial} = 0,2$ MM	0,016	-7,706	0,522	
			$R_{np} = 3 \text{ MM}$	22,587	-0,473	-1,752	
	$σ_{xyA}$, kΓC/MM ²	$h_{\scriptscriptstyle \partial}$, мм	$a_{o} = 0,05 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	27,171	-0,446	-2,19	
$y = a \cdot (x+b)^2 + c$	(X10 MIIIa)		$a_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	17,769	-0,527	-1,223	
	σ_{xyB} , кгс/мм ² (х10 МПа)	$R_{_{np}}$, MM		0,371	-6,369	-10,016	
	$h\sigma_{_{xyB}}$, мм		$R_{np} = 3 \text{ MM}$	3,605	-0,35	-1,4	
	ha wu	h_{∂} , мм	$a_{\partial} = 0,05 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	10,152	-0,677	-4,823	
	nO_{xy0} , MM		$a_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	10,225	-0,757	-5,678	
$y = a \cdot \exp(x) + b$	$h\sigma_{_{x0}}$, мм		$R_{np} = 3 \text{ MM}$	15,804	-17,046	-	
	$\sigma_{_{xvA}}$, кгс/мм ²		$h_{\partial} = 0,1 \text{ mm}$	-0,194	2,907	-	
	(х10 МПа)	n_{np} , wim	$h_{\partial} = 0,2$ MM	-0,441	2,157	-	
$y = a \cdot x + b$	b σ_{xyB} , кгс/мм ² (х10 МПа)	h vo	$a_{o} = 0,05 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	-4,85	-4,782	-	
		n_{∂} , mm	$a_{\partial} = 0,1 \text{ MM}$ $R_{np} = 3 \text{ MM}$	-7,333	-4,423	-	

Характер распределения и величина осевых напряжений (σ_x), в значительной степени определяются профильным радиусом ролика R_{np} и действительным натягом h_{∂} . Установлено, что изменение действительного зазора a_{∂} практически не влияет на расположение характерных точек и распределение эпюры σ_x по глубине поверхностного слоя.

Взаимосвязь значения σ_x на поверхности детали с действительным натягом h_0 описана кусочной функцией (рис. 3.10). При значениях $h_0 > 0,24$ *мм* - это логарифмическая взаимосвязь, в то время как при малых значениях

действительного натяга ($h_{\partial} < 0,24$ мм) она с высокой достоверностью описана экспоненциальной зависимостью.

Выявлено, что наибольшие абсолютные значения сжимающих напряжений на поверхности наблюдаются именно в точке смены аппроксимирующей функции ($h_{\partial} = 0,24 \text{ мм}$), при этом, для $R_{np} = 3 \text{ мм}$ они достигают значений порядка $\sigma_{xA} = -200 \text{ MII}a$.

Установлено, что уменьшение абсолютных значений сжимающих напряжений σ_{xA} при увеличении действительного натяга свыше $h_{\partial} = 0,24$ мм в большей степени вызвано тепловой разгрузкой, значительно возрастающей на поверхности детали.

Анализ показал, что взаимосвязь значения σ_x на поверхности с профильным радиусом ролика R_{np} с наибольшей точностью описываются параболой, значения коэффициентов которой меняются в зависимости от действительного натяга (рис. 3.11).







Рис. 3.11. Зависимости компонента σ_x на поверхности и в первом подповерхностном экстремуме от профильного радиуса ролика R_{np}

Анализ показал, что положение экстремума параболы определяется коэффициентами и также зависит от выбранного действительного натяга. Так, например, при значениях $h_0 = 0,1 \, mm$ наибольшие абсолютные значения сжимающих напряжений ($\sigma_{xA} = -90 \, M\Pi a$) наблюдаются при $R_{np} = 9 \, mm$, а при $h_0 = 0,2 \, mm$ - при $R_{np} = 6 \, mm$ ($\sigma_{xA} = -220 \, M\Pi a$). Установлено также, что с увеличением действительного натяга усиливается влияние R_{np} на осевые напряжения на поверхности.

Таким образом, для каждого профильного радиуса ролика существует оптимальный действительный натяг, обеспечивающий наибольшие значения сжимающих осевых напряжений на поверхности. Справедливо и обратное: для каждого действительного натяга существует оптимальное значение профильного радиуса, приводящее к наибольшим осевым сжимающим напряжениямна поверхности детали.

Значения σ_x в точке 1-го подповерхностного экстремума (точка **B**, рис. 3.2) в значительной степени зависят от действительного натяга h_{∂} и практически нечувствительны к изменению действительного зазора a_{∂} . Такая взаимосвязь при $R_{np} = 3 \text{ мм}$ с достоверностью 98% описана экспонентой (рис. 3.10).

По мнению автора, это предоставляет широкие возможности по управлению механическим состоянием поверхностного слоя: с одной стороны накопление деформации наиболее чувствительно к изменению a_{∂} и в меньшей степени к изменению h_{∂} , а с другой величина осевых ОН, как было сказано, в большей степени чувствительна к h_{∂} и практически не подвержена влиянию a_{∂} .

Увеличение профильного радиуса ролика также вызывает значительное увеличение абсолютных значений сжимающих напряжений σ_x в точке B, описанное логарифмической функцией, коэффициенты которой меняются в зависимости от значений действительного натяга (рис. 3.11).

При одновременном увеличении h_{∂} и R_{np} , эти факторы в определенной степени усиливают действие друг друга, что наглядно демонстрирует объемная модель. Осевые напряжения в точке B, достигаемые при максимальных значениях действительного натяга и профильного радиуса ролика, составляют $\sigma_{xB} = -800 M\Pi a$ (рис. 3.12).

Результаты исследований показали, что наряду с численными значениями напряжений в 1-ом экстремуме, важной характеристикой является глубина расположения указанного экстремума. Установлено, что возрастание действительного натяга, наряду с ростом σ_{xB} , значительно увеличивает глубину расположения экстремума осевых напряжений ($h\sigma_{xB}$) (рис. 3.13). То же происходит и при увеличении профильного радиуса ролика (рис. 3.14).

Сказанное подтверждает и объемная модель, показывающая, что при максимальных значениях варьируемых факторов глубина расположения экстремума достигает $h\sigma_{xB} = 10 \text{ мм}$ (рис. 3.15).



Рис. 3.12. Зависимость компонента σ_x в первом экстремуме от действительного натяга h_0 и профильного радиуса ролика R_{np}

На наш взгляд, явление смещения экстремума значений σ_x в глубину в наибольшей степени вызвано возрастающим при увеличении натяга и профильного радиуса ролика воздействием тепловой разгрузки. Эпюра тепловой разгрузки, распространяясь на большую глубину, тем самым «сдвигает» экстремум σ_x в глубину поверхностного слоя.



Рис. 3.13. Зависимости глубины расположения первого экстремума ($h\sigma_{xB}$) и глубины распространения сжимающих напряжений ($h\sigma_{x0}$) от h_{∂} ($R_{np} = 3 \text{ мм}$)



Рис. 3.14. Зависимости глубины расположения первого экстремума ($h\sigma_{xB}$) и глубины распространения сжимающих напряжений ($h\sigma_{x\theta}$) от R_{np}



Рис. 3.15. Зависимость глубины расположения первого экстремума $h\sigma_{xB}$ от действительного натяга h_{∂} и профильного радиуса ролика R_{np}

Одним из достоинств способа РСО при формировании поверхностного слоя является способность распространения сжимающих ОН на значительную глубину.

Для осевой составляющей взаимосвязь глубины распространения сжимающих напряжений $h\sigma_{x0}$ с действительным натягом при $R_{np} = 3 \ \text{мm}$ описана экспоненциальной функцией (рис. 3.13). С ростом действительного натяга глубина распространения сжимающих напряжений увеличивается и при максимальных значениях h_0 достигает значений $h\sigma_{x0} = 10 \ \text{мm}$. С увеличением R_{np} наблюдается аналогичная картина (рис. 3.14).

Как показывает анализ объемной модели (рис. 3.16), при таком характере распределения с учетом одновременного роста обоих факторов достигаются значения $h\sigma_{x0} = 18 \text{ мм}$.



Рис. 3.16. Зависимость глубины распространения компоненты эпюры ОН $h\sigma_{x0}$ от действительного натяга h_0 и профильного радиуса ролика R_{np}

Составляющая тензора ОН, действующая перпендикулярно оси детали (σ_y) , также определяется профильным радиусом ролика R_{np} и действительным натягом h_{∂} . Зафиксировано также некоторое влияние действительного зазора a_{∂} на расположение характерных точек эпюры σ_y .

Выявлено, что в целом составляющая σ_y характеризуется небольшими значениями сжимающих и растягивающих напряжений. Напряжения на поверхности детали являются растягивающими и увеличиваются с увеличением действительного натяга h_{∂} , оставаясь при этом в пределах до 40 *МПа* (рис. 3.17).

Установлено, что действительный зазор не влияет на величину σ_y на поверхности.







Рис. 3.18. Зависимости компонента σ_y на поверхности и в первом экстремуме от профильного радиуса ролика R_{np} ($h_{\partial} = 0, 2 \text{ мм}$)

При $h_{0} < 0,2$ *мм* взаимосвязь σ_{yA} с профильным радиусом ролика слабо выражена (рис. 3.18), изменения сопоставимы с величиной погрешности определения. При увеличении $h_{0} > 0,2$ *мм* эта взаимосвязь имеет более ярко выраженный характер, что подтверждается объемной моделью (рис. 3.19).



Рис. 3.19. Зависимость напряжений σ_v на поверхности от R_{np} и h_d

Величина σ_y в точке 1-го экстремума (точка **B**, рис. 3.2) в значительной степени зависит от действительного натяга h_{∂} , что при $R_{np} = 3$ *мм* описано логарифмической функцией (рис. 3.17).

При увеличении профильного радиуса ролика ($h_{\partial} = 0, 2 \, MM$) происходит экспоненциальный рост сжимающих напряжений σ_{yB} , который прекращается при $R_{np} > 9 \, MM$, достигнув значений $\sigma_{yB} = -90 \, M\Pi a$ (рис. 3.18).

При $h_{\partial} = 0,1$ *мм* точка 1-го экстремума под поверхностью отсутствует: эпюра σ_y , начинаясь от некоторого значения на поверхности, распространяется до точки 2-го экстремума (точка **D** на рис. 3.2). Анализ показал, что параметры режима не обнаруживают взаимосвязь с глубиной расположения рассматриваемого экстремума ($h\sigma_{vB}$).

Глубина расположения сжимающих напряжений σ_y обнаруживает взаимосвязь с параметрами режима (рис. 3.20 - 3.22). С увеличением натяга, как и с увеличением профильного радиуса ролика, она экспоненциально возрастает, достигая значений порядка $h\sigma_{y0} = 10-12$ мм (рис. 3.20 - 3.21).

Как показал анализ, касательная составляющая тензора остаточных напряжений (σ_{xy}) в целом характеризуется небольшими значениями положительных и отрицательных напряжений, лежащих в диапазоне от $\sigma_{xy} =$ -110 МПа до $\sigma_{xy} = 40$ МПа. Глубина распространения до точки первых нулевых значений при отдельных режимах достигает 5 - 6 мм.

Установлено, что касательные напряжения на поверхности детали при некотором оптимальном натяге имеют наибольшие по абсолютной величине отрицательные значения. Для $R_{np} = 3 \ mm$ такой экстремум наблюдается при $h_0 = 0,47 \ mm$ (рис. 3.23), однако при детальном рассмотрении было выявлено, что значение оптимального натяга h_0 и величина σ_{xyA} при таком натяге зависят от действительного зазора a_0 .

Выявлено, что профильный радиус ролика с 85% достоверностью имеет линейную взаимосвязь с σ_{xyA} (рис. 3.24). Коэффициенты представленных линейных взаимосвязей изменяются в зависимости от натяга.

Величина σ_{xy} в точке 1-го экстремума с высокой достоверностью имеет линейную зависимость от действительного натяга, а значения коэффициентов зависят от действительного зазора (рис. 3.23).

Наибольшие по абсолютным значениям отрицательные напряжения σ_{xy} в точке 1-го экстремума наблюдаются при $R_{np} = 6,4$ мм, при этом данная взаимосвязь описана параболой (рис. 3.24).

Глубина расположения 1-го экстремума зависит от действительного натяга. Максимальные значения для $R_{np} = 3$ *мм* наблюдаются при $h_{\partial} = 0,35$

мм (рис. 3.25), при этом изменение профильного радиуса на глубину расположения экстремума не влияет.





Рис. 3.20. Зависимость $h\sigma_{y\theta}$ от h_{∂}

 $(\mathbf{R}_{np}=\mathbf{3} \mathbf{M}\mathbf{M})$





Рис. 3.22. Зависимость $h\sigma_{y0}$ от действительного натяга h_0 и профильного радиуса ролика R_{np}



Рис. 3.23. Зависимости касательных напряжений на поверхности и в первом экстремуме от h_{∂} при различных значениях $a_{\partial}(R_{np} = 3 \text{ мм})$



Рис. 3.24. Зависимости касательных напряжений на поверхности и в первом экстремуме от R_{np} при различных значениях h_{∂}



глубины распространения компоненты σ_{xy} от натяга h_{∂} ($R_{np} = 3 \text{ мм}$)

Взаимосвязь глубины распространения отрицательных касательных напряжений $h\sigma_{xy\theta}$ с натягом h_{∂} имеет вид параболы, при этом зафиксировано также некоторое влияние действительного зазора (рис. 3.25). Максимальная глубина распространения отрицательных напряжений с увеличением a_{∂} увеличивается, это происходит при значениях действительного натяга $h_{\partial} = 0,6..0,8$ *мм*. Изменение профильного радиуса ролика от 2 до 10 *мм* в некоторой степени влияет на глубину $h\sigma_{xy\theta}$, однако изменение последней при этом не превышает $0,6 \, \text{мм}$.

Анализируя полученные взаимосвязи и сравнивая с результатами других авторов, можно отметить, что увеличение натяга при РСО приводит к увеличению глубины распространения сжимающих напряжений, увеличению сжимающих напряжений в первом экстремуме, однако смещает экстремум в глубину поверхностного слоя. Увеличение усилия обкатывания при ППД по данным В.М. Смелянского и Ч.Н. Абсара также приводит к росту сжимающих ОН. По результатам исследований этих авторов величина осевых ОН достигает *-800 МПа*, а окружных напряжений – *-400 МПа* [1].

Увеличение профильного радиуса ролика также вызывает увеличение сжимающих напряжений 1-го экстремума и глубины его расположения. Это несколько не соответствует результатам работы [3], согласно которым увеличение R_{np} приводит к некоторому снижению указанных показателей.

Увеличение зазора резца, согласно исследованиям того же автора, вызывает уменьшение напряжений 1-го экстремума, однако полученные результаты не обнаружили значительного влияния этого фактора на величину и глубину расположения ОН.

Осевые остаточные напряжения σ_x имеют одинаковый знак с тангенциальными σ_z . В отдельных случаях обработки РСО величина осевых ОН приближается к пределу текучести металла.

Похожие результаты получены В.Ю. Блюменштейном для тангенциальных (окружных) ОН при РСО [3]. При сопоставлении этих результатов с расчетными распределениями тангенциальной компоненты σ_z установлено, что в целом, компоненты имеют одинаковые численные значения и характер распределения. Однако, при этом, расчетная кривая расположена на большем расстоянии от поверхности (рис. 3.26).

Отношение значений осевых ОН к тангенциальным в среднем составляет $\sigma_x / \sigma_z = 2$. Это соответствует результатам работ Д.Д. Папшева и других авторов, согласно которым это соотношение варьируется в диапазоне *1*,*7..2*,*2* [32-34].

Результаты исследований ОН при ППД, представленные в работах [1], показывают, что при увеличении R_{np} происходит увеличение компонент σ_x и σ_z в первом экстремуме и уменьшение этих же компонент на поверхности.

В целом, полученные результаты соответствуют результатам работ [1,3]. Проведенный анализ показывает, что для получения больших значений

и глубин распространения сжимающих напряжений, необходимо стремиться обрабатывать детали с большим натягом и профильным радиусом ролика. Однако для получения наибольших значений на поверхности, значение действительного натяга должно оставаться на уровне 0,2..0,3 мм.



Рис. 3.26. Распределение расчетных значений компонента σ_z ОН после РСО и окружных ОН σ_{θ} , экспериментально полученных в работе [3], по глубине ПС

3.1.4. Сравнительный анализ компонент тензора остаточных напряжений после упрочняющей обработки способами поверхностного пластического деформирования и размерного совмещенного обкатывания

Качественное сравнение компонент тензоров ОН для обоих способов УО приведено в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Сравнение компонент тензора ОН после обработки способами ППД и РСО

Параметр		Диапазон изменения параметра							
Название	Обозначе ние	ппд	РСО						
Параметры режима обработки									
Профильный радиус роликов	R_{np} , мм	1.610	210						
Действительный натяг роликов	h_{∂} , мм	0,030,1	0,10,8						
Действительный зазор резца	a_{∂} , MM	отсутствует	0,050,4						
Расчетный натяг роликов	h_p , мм	отсутствует	0,150,85						
Характерные точки эпюр компонент	г тензора ост	аточных напр	яжений						
Осевой комп	онент (σ_x)								
Напряжения на поверхности детали	$σ_{xA}$, ΜΠα	-700+240	-210+100						
Напряжения в первом экстремуме	σ_{xB} , MПa	экстремум	-35030						
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{\!xB}$, мм	отсутствует	0,673,33						
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{\!x0}$, мм	0,11	1,510						
Напряжения во втором экстремуме	$\sigma_{xD},$ M Π a	+110+1500	+45+270						
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{\!x\!D}$, мм	0,24,4	2,6716,67						
Глубина затухания	$h\sigma_{\!\! xE}$, мм	1,68,6	635						
Радиальный компонент (σ _v)									
Напряжения на поверхности детали	$σ_{yA}$, ΜΠα	-380+140	0+40						
Напряжения в первом экстремуме	$σ_{yB}$, ΜΠα	экстремум	-1190						
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{\!\! yB}$, мм	отсутствует	1,335,33						
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{\!\scriptscriptstyle y0}$, мм	00,4	1,511,6						
Напряжения во втором экстремуме	$σ_{yD}$, ΜΠα	+160+2560	+30+150						
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{\!\! yD}$, мм	0,23,8	1,3320						
Глубина затухания	$h\sigma_{\!\!y\!E}$, мм	910	4,540						
Окружной (тангенциал	ьный) компо	нент (о _г)							
Напряжения на поверхности детали	$σ_{zA}$, ΜΠα	-290+50	-100+50						
Напряжения в первом экстремуме	$\sigma_{zB},$ M Π a	экстремум	-200+70						
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{\!\!zB}$, мм	отсутствует	04						
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{\!\!z0}$, мм	0,150,8	110,4						
Напряжения во втором экстремуме	$\sigma_{zD},$ M Π a	+120+1780	+35+190						
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{\!\! zD}$, мм	0,24,2	216,67						
Глубина затухания	$h\sigma_{\!\!zE}$, мм	710	735						
Касательный компонент в плоск	ости главны.	х деформаций	(σ_{xy})						
Напряжения на поверхности детали	$σ_{xyA}$, ΜΠα	-120+80	-20+25						
Напряжения в первом экстремуме	$\sigma_{xyB},$ МПа	экстремум	-10050						
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{\!xyB}$, мм	отсутствует	0,671,33						
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{\!xy0}$, мм	0,20,6	2,25,66						
Напряжения во втором экстремуме	σ_{xyD} , МПа	-132085	+30+85						
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{xyD}$, мм	0,42,4	1,3320						
Глубина затухания	$h\sigma_{xvE}$, MM	6,810	1640						

в категориях координат характерных точек (см. рис. 3.2)

В сравнении с ОН после упрочняющей обработки ППД, тензор ОН при РСО в целом имеет похожий характер распределения, однако характеризуется:

- значительно большей глубиной распространения сжимающих напряжений, достигающей 10 мм, против 1-3 мм при традиционном ППД;

- меньшими (до -250 МПа) значениями сжимающих остаточных напряжений на поверхности (при ППД величина таких напряжений приближается к пределу текучести упрочненного металла);

- меньшими (до 270 МПа) значениями растягивающих остаточных напряжений во втором экстремуме (при ППД величина таких напряжений приближается к пределу текучести упрочненного металла);

- осевые остаточные напряжения σ_x имеют одинаковый знак с тангенциальными σ_z ;

- наличием первого подповерхностного (отрицательного) экстремума, образование которого вызвано значительно большей, чем при традиционном ППД, тепловой разгрузкой на поверхности детали, возникающей вследствие на порядок больших значений натяга роликов. Значения сжимающих ОН в 1- ом экстремуме при РСО приближаются к пределу текучести упрочненного металла. Глубина расположения такого экстремума изменяется в зависимости от режимов обработки и достигает значений 3,5 мм от поверхности.

Последнее хорошо согласуется с результатами Д.Д. Папшева. обработки ППД шариком. Автор полученными для подчеркивает возможность образования экстремума сжимающих ОН как на поверхности детали, так и на некоторой глубине в зависимости от степени воздействия тепловой разгрузки [28].

Представленные аналитические закономерности позволяют прогнозировать распределение составляющих тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя в зависимости от технологических режимов упрочняющей обработки способами ППД и РСО.

3.2. Закономерности трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадии циклического эксплуатационного нагружения

3.2.1. Постановка задачи моделирования

В соответствии с научными положениями механики технологического наследования, на стадии циклической долговечности продолжается процесс накопления деформации и исчерпания запаса пластичности, протекающий в условиях непрерывной релаксации тензора остаточных напряжений [3].

При моделировании механического состояния поверхностного слоя на стадии циклической долговечности было принято:

1. Состояние поверхностного слоя после обработки РСО является исходным для стадии циклической долговечности.

2. При эксплуатации деталь подвергается многоцикловому усталостному симметричному знакопеременному нагружению по схеме консольного изгиба с вращением.

3. Тензоры усталостных (эксплуатационных) и остаточных напряжений заданы в декартовой системе координат.

4. Расчет накопленных параметров механического состояния осуществляется в условиях непрерывной релаксации остаточных напряжений и трансформации показателя схемы напряженного состояния.

5. Окончанию стадии циклической долговечности соответствует момент накопления предельных деформаций, полного исчерпания запаса пластичности ($\Psi = 1$) и полной релаксации тензора остаточных напряжений $[T\sigma_{ocm}] = 0.$

6. Накопление предельных деформаций, полное исчерпание запаса пластичности и зарождение усталостной трещины происходит в некоторой точке вероятного разрушения, которая может быть расположена как на поверхности, так и на некотором удалении от нее.

Таким образом, на стадии циклической долговечности требуется знание как напряженного состояния, так и соответствующих ему параметров деформированного состояния, включая степень деформации сдвига и степень исчерпания запаса пластичности.

При оценке напряженного состояния был принят закон релаксации остаточных напряжений под воздействием циклических нагрузок, полученный в работе [3] (рис. 3.27):

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{a}{\ln(bN^c)},\tag{3.4}$$

где σ_0 - начальное значение компонента остаточных напряжений в опасной точке; *N* - текущее значение количества циклов; *a*,*b*,*c* - коэффициенты.



Рис. 3.27. Эпюры релаксации компонент остаточных напряжений в зависимости от числа циклов нагружения

Усталостные напряжения по принятой схеме нагружения обусловлены действием поперечной силы, которая лежит в плоскости симметрии образца. Поэтому можно считать, что напряжения кручения не возникают, а в рабочем сечении образца действуют касательные и нормальные (осевые) напряжения. по мнению Ю.Н. Работнова, при достаточно большом соотношении длины к диаметру образца касательные напряжения уменьшаются и составляют сравнительно небольшую часть от нормальных [31].

Таким образом, можно считать, что в рабочем сечении образца действуют только нормальные усталостные напряжения, знак которых дважды изменяется в каждом цикле нагружения. Распределение этих напряжений по глубине поверхностного слоя подчиняется линейному закону:

$$(\sigma_x)_y = \sigma_x - \frac{2}{D_o} \cdot y \cdot \sigma_x, \qquad (3.5)$$

где *у* - глубина, на которой определяются напряжения.

Изменение амплитуды напряжений цикла происходит по синусоидальному закону:

$$\sigma_a = (\sigma_a)_i \cdot \sin \varphi \,, \tag{3.6}$$

где ϕ - угол поворота образца.

Результирующее напряженное состояние определяется суперпозицией остаточных и усталостных напряжений. При совпадении направлений векторов главных напряжений для обеих составляющих и симметричном цикле усталостных напряжений поверхностный слой изделия работает в условиях асимметрии цикла тем большей, чем больше остаточные напряжения. Среднее напряжение цикла при этом равно остаточному напряжению, а амплитуда равна напряжению от внешней нагрузки. В условиях циклического нагружения сжимающие остаточные напряжения повышают, а растягивающие - снижают усталостную долговечность. При этом, чем ближе значение результирующих напряжений к пределу текучести, тем с большей скоростью происходит полная релаксация остаточных напряжений [3].

Исходя из вышесказанного, тензор действующих напряжений может быть представлен в виде суммы тензоров остаточных и усталостных напряжений:

$$[T\sigma_{\delta}] = [T\sigma_{ocm}] + [T\sigma_{ycm}] = \begin{pmatrix} (\sigma_{x})_{ocm} & (\sigma_{xy})_{ocm} & 0\\ (\sigma_{xy})_{ocm} & (\sigma_{y})_{ocm} & 0\\ 0 & 0 & (\sigma_{z})_{ocm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (\sigma_{x})_{ycm} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} (\sigma_{x})_{ocm} + (\sigma_{x})_{ycm} & (\sigma_{xy})_{ocm} & 0\\ (\sigma_{xy})_{ocm} & (\sigma_{y})_{ocm} & 0\\ 0 & 0 & (\sigma_{z})_{ocm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\sigma_{x})_{\delta} & (\sigma_{xy})_{\delta} & 0\\ (\sigma_{xy})_{\delta} & (\sigma_{y})_{\delta} & 0\\ 0 & 0 & (\sigma_{z})_{ocm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\sigma_{x})_{\delta} & (\sigma_{xy})_{\delta} & 0\\ (\sigma_{xy})_{\delta} & (\sigma_{y})_{\delta} & 0\\ 0 & 0 & (\sigma_{z})_{\delta} \end{pmatrix}$$
(3.7)

Для оценки накопления деформации и исчерпания запаса пластичности на стадии ЦД, по аналогии со стадиями механической обработки, В.Ю. Блюменштейном был предложен новый параметр – показатель схемы напряженного состояния, являющийся аналогом показателя схемы на стадиях механической обработки [3]:

$$\Pi_{\partial} = \frac{\sigma_{\partial}}{T_{\partial}},\tag{3.8}$$

где σ_{o} - среднее нормальное действующее напряжение; T_{o} - интенсивность действующих касательных напряжений.

Непрерывная релаксация остаточных напряжений и соответствующее ей изменение тензора действующих напряжений в процессе циклического нагружения вызывают трансформацию показателя схемы напряженного состояния.

На старте стадии циклической долговечности усталостные напряжения отсутствуют и показатель схемы определяется через компоненты остаточных напряжений:

$$\Pi_{\partial} = \frac{\sqrt{6 \cdot ((\sigma_1)_{ocm} + (\sigma_2)_{ocm} + (\sigma_3)_{ocm})}}{3 \cdot \sqrt{((\sigma_1)_{ocm} - (\sigma_2)_{ocm})^2 + ((\sigma_2)_{ocm} - (\sigma_3)_{ocm})^2 + ((\sigma_3)_{ocm} - (\sigma_1)_{ocm})^2}}.$$
(3.9)

В процессе циклического нагружения показатель схемы определяется через компоненты действующих напряжений:

$$\Pi_{\partial} = \frac{\sqrt{6} \cdot ((\sigma_{1})_{\partial} + (\sigma_{2})_{\partial} + (\sigma_{3})_{\partial})}{3 \cdot \sqrt{((\sigma_{1})_{\partial} - (\sigma_{2})_{\partial})^{2} + ((\sigma_{2})_{\partial} - (\sigma_{3})_{\partial})^{2} + ((\sigma_{3})_{\partial} - (\sigma_{1})_{\partial})^{2}}}.$$
(3.10)

Окончанию стадии циклической долговечности соответствует момент образования в поверхностном слое усталостной трещины, полностью релаксирует тензор остаточных напряжений и в рабочем сечении действуют только усталостные напряжения. Показатель схемы для этого момента времени при $[T\sigma_{ocm}] = 0$ составляет:

$$\Pi_{\partial} = \frac{(\sigma_x)_{ycm}}{\sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_x)_{ycm}^2 + (\sigma_x)_{ycm}^2]}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx \pm 0,577.$$
(3.11)

Расчет глубины зарождения усталостной трещины осуществлялся на основе анализа распределения показателя схемы напряженного состояния по глубине поверхностного слоя для 1-го цикла нагружения. Согласно данным работы [3] с наибольшей вероятностью зарождение усталостной трещины происходит в точке, где показатель схемы принимает минимальные значения.

Для выявленной глубины зарождения трещины с учетом изменения тензора действующих остаточных напряжений осуществлялся расчет трансформации показателя схемы, а затем расчет накопления деформации и исчерпания запаса пластичности на протяжении стадии циклической долговечности:

$$\Lambda = \Lambda_{PCO} + \frac{a}{\left(\exp\left(-b\overline{\Pi}^{c}\right)\right)^{d}},$$
(3.12)

где Λ_{PCO} - степень деформации сдвига, накопленная при обработке РСО, $\overline{\Pi}$ - среднее значение показателя схемы напряженого состояния в процессе усталостного нагружения, *a*, *b*, *c* и *d* – наследственные коэффициенты. Второе слагаемое выражения (3.12) представляет собой программу нагружения на стадии циклической долговечности.

При расчетах было принято:

- уменьшение численных значений компонент остаточных напряжений происходит пропорционально числу циклов в соответствии с выбранным законом релаксации;

- отсутствует дрейф точки зарождения усталостной трещины.

Расчеты исчерпания запаса пластичности позволили определить предельное значение степени деформации сдвига Λ_p для данного сочетания

факторов обработки РСО и усталостного нагружения, соответствующее окончанию стадии ЦД.

Для определения зависимости накопленной степени деформации сдвига от количества циклов нагружения было использовано нормирование числа циклов относительно максимального значения (циклической долговечности):

$$[N] = 2,1 \cdot \exp\left(-\frac{(\overline{\Pi} - 0,62)^2}{0,4967}\right).$$
(3.13)

Для выполнения расчетов была разработана методика оценки накопления деформаций в основу которой положены представления о продолжающемся упрочнении металла в процессе циклического нагружения на стадии циклической долговечности.

Известно, что металлы с соотношением $\sigma_B / \sigma_{02} = 1,4$ и выше относятся к циклически упрочняющимся [15]. Для использованных в исследованиях металлов, в том числе и стали 45, соотношение $\sigma_B / \sigma_{02} > 1,4$, что позволяет отнести их к указанной категории.

Согласно исследованиям И.В. Кудрявцева, В.Ф. Терентьева, Г.Д. Деля, В.А. Крохи и др., на стадии циклического нагружения происходит повышение плотности дислокаций и рост деформационного упрочнения металла детали [15,35-38]. Поэтому, было принято, что рост упрочнения происходит до некоторого предельного значения (δ_{uo}), соответствующего окончанию стадии циклической долговечности. Таким образом, к моменту окончания стадии ЦД твердость (микротвердость) упрочненного поверхностного слоя в точке вероятного разрушения достигает предельных значений (hv_{uo}), характерных для данного материала, режимов обработки и условий нагружения.

Зависимость интенсивности напряжений от степени деформации сдвига для стали 45 по результатам испытаний была принята в виде [3]:

$$\sigma_i = 36 + 58,41 \cdot \Lambda^{0,43} \,. \tag{3.14}$$

Испытания позволили также определить зависимости между твердостью по Виккерсу и параметрами напряжений и деформаций [3]:

$$\begin{cases} HV = 170 + 170 \cdot e - 109 \cdot e^2; \\ HV = 135 + \sigma_i. \end{cases}$$
(3.15)

где *е* – логарифмическая степень деформации, σ_i – интенсивность напряжений.

Пересчет в категориях накопленной степени деформации сдвига позволил получить взаимосвязь с твердостью поверхностного слоя (рис. 3.28):

$$HV = 171 + 58,41 \cdot \Lambda^{0,43} \,. \tag{3.16}$$

Предложенный подход расчета циклической долговечности требует проведения дополнительных экспериментальных исследований, суть которых заключается в фиксации изменения твердости (микротвердости) в процессе циклического нагружения упрочненной РСО детали в соответствующем рабочем сечении.

Экспериментальные исследования позволили установить взаимосвязь микротвердости поверхностного слоя с количеством циклов усталостного нагружения и рассчитать циклическую долговечность детали.



сдвига и интенсивности напряжений для стали 45

В качестве примера был проведен расчет циклической долговечности для образца №107₁ после РСО. Исходя из распределения показателя схемы по глубине поверхностного слоя, определили опасный с точки зрения зарождения трещины диапазон глубины 0,15..0,3 мм от поверхности (рис. 3.29, а). Для сравнения, после обработки ППД для выборки, представленной на рис. 3.29, б, была определена глубина зарождения трещины 0,2-0,25 мм.

Для этих глубин были определены начальные и предельные значения степени деформации сдвига и микротвердости поверхностного слоя. Экспериментально полученные значения тех же параметров после N = 1,25 *млн. циклов* позволили с использованием аналитического аппарата рассчитать циклическую долговечность для образца $\mathcal{N} 107_I$, на поверхности и предполагаемых глубинах зарождения трещины (табл. 3.4).



Рис. 3.29. Распределение показателя схемы напряженного состояния по глубине упрочненного поверхностного слоя в процессе циклического нагружения: 1 и 2 – при максимальном и минимальном значении амплитуды цикла; 3 – среднее значение;

Глубина	Начальные значения				Предельные значения			Экспериментальные			
располо	(после обработки РСО)			на финише стадии			значения (после <i>N</i> = 1,25			<i>Nцд</i> ,	
жения				ЦД (<i>Ψ</i> =1)			<i>млн. циклов</i> нагружения)			млн.	
точки	1.000	W aga	HVnaa	8	4	HV	8	HV	4	8	циклов
у, мм	ПРСО	1 PCO	11 V PCO	Орсо	тцд	пуцд	ОЦД	11 / 1,25	717,25	01,25	
0	3,00	0,650	243	1,429	3,80	274,7	1,616	260	2,66	1,529	2,33
0,2	2,88	0,620	242	1,424	3,78	274,5	1,615	260	2,66	1,529	2,25
0,3	2,82	0,610	241	1,418	3,71	273,6	1,610	259	2,59	1,524	2,27
0,4	2,76	0,598	238	1,400	3,72	273,8	1,610	257	2,46	1,512	2,35

Значения Λ , Ψ , HV для образца $N \ge 107_1$ на стадии циклической долговечности

Как показал анализ, наименьшее значение циклической долговечности наблюдается на глубине y = 0,2 *мм*. Таким образом, для образца $N \ge 107_1$ зарождение усталостной трещины происходит на указанной глубине $h_{mp} = 0,2$ *мм*, а значение ЦД на этой глубине являются искомой длительностью стадии ЦД: $N_{III} = 2,25$ *млн. циклов*.

Разработка модели механического состояния поверхностного слоя упрочненной детали на стадии циклического нагружения позволила оценить продолжающееся накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности по распределению микротвердости упрочненного поверхностного слоя детали, что, в свою очередь, позволило расчетным путем установить взаимосвязь циклической долговечности N_{μ} с режимами и накопленными значениями Λ и Ψ при УО.

3.2.2. Аналитическое описание наследственных закономерностей трансформации состояния поверхностного слоя в процессе

эксплуатационного циклического нагружения

Разработанная модель механического состояния поверхностного слоя на стадии циклической долговечности позволила детали оценить закономерности накопления деформаций, исчерпания запаса пластичности и релаксации тензора остаточных напряжений в процессе усталостного нагружения. Использование указанной модели результатов И
экспериментальных исследований позволило рассчитать глубину зарождения усталостной трещины h_{mp} , накопленную на стадии циклической долговечности степень деформации сдвига $\Delta \Lambda_{\mu\mu}$ и количество циклов нагружения $N_{\mu\mu}$.

Циклическая долговечность определялась расчетно-аналитическим путем на основе экспериментальных исследований. Численные значения параметров стадии ЦД для моделей представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

N₂	No	11	8	Anger	N _{ЦД} , млн.
модели	образца	шц	ОЦД	² 1 <i>PCO(h)</i>	циклов
1	1071	0,75	1,531	1,45	2,251
2	5 ₂	1,26	1,553	0,75	3,187
3	1152	2,02	1,585	1,45	5,316
4	1159	1,91	1,580	1,02	4,936
5	494	1,49	1,563	1,36	3,732
6	43 ₃	1,89	1,579	1,01	4,879
7	1076	0,95	1,540	1,32	2,586
8	1077	0,59	1,525	1,39	2,016
9	1078	1,23	1,552	0,42	3,121
10	1013	1,18	1,550	1,32	3,016
11	1012	1,44	1,561	0,84	3,609
12	2055	0,17	1,507	1,39	1,521
13	1042	2,28	1,596	1,08	6,360
14	2042	2,17	1,591	1,34	5,905
15	49 ₅	1,70	1,571	1,34	4,288
16	49 ₆	1,33	1,556	1,27	3,343
17	1063	1,98	1,583	0,17	5,175
18	1052	1,76	1,574	0,93	4,465
19	574	1,06	1,545	1,28	2,785
20	578	0,49	1,520	1,15	1,882

Численные значения параметров стадии циклической долговечности

В табл. 3.5 приняты следующие обозначения: $\delta_{\mu\mu}$ – предельное значение степени упрочнения поверхностного слоя, соответствующее

окончанию стадии циклической долговечности; $\Lambda_{PCO(h)}$ – степень деформации сдвига, накопленная при УО на глубине зарождения усталостной трещины.

В результате анализа полученных данных были определены зависимости циклической долговечности и глубины зарождения усталостной трещины от режимов обработки и накопленных на стадии РСО параметров взаимосвязи, механического состояния. Представленные ниже при отсутствии специальных комментариев, объясняют не менее 85% дисперсии Относительная погрешность определения результатов. при этом не превышает 10%.

Установлено, что основные параметры режима РСО оказывают наследственное влияние на степень деформации сдвига, накапливаемую на стадии циклической долговечности (рис. 3.30-3.31). При $R_{np} = 3 \ \text{мм}$ и $a_0 = 0, 1..0, 2 \ \text{мм}$ взаимосвязь с действительным натягом имеет экстремум, который наблюдается при значениях $h_0 = 0, 6 \ \text{мм}$ (рис. 3.30):

$$\Delta \Lambda_{III} = 2,049 - 3,502 \cdot (h_{\partial} - 0,598)^2.$$
(3.17)

С увеличением действительного зазора величина $\Delta \Lambda_{III}$ снижается (рис. 3.31). По мнению автора, это вызвано тем, что в поверхностном слое происходит значительное увеличение степени деформации сдвига, накапливаемой при РСО. При значениях режима $h_{\partial} = 0,1$ *мм* и $R_{np} = 3$ *мм*:

$$\Delta \Lambda_{\mu\mu} = 2,643 \cdot \exp(-4,613 \cdot a_{\partial}); \qquad (3.18)$$

При $h_0 = 0,2$ *мм* и $R_{np} = 3$ *мм*:

$$\Delta \Lambda_{III} = 2,094 \cdot \exp(-0,862 \cdot a_{a}); \qquad (3.19)$$

С увеличением профильного радиуса ролика величина $\Delta \Lambda_{III}$ возрастает (рис. 3.31). Такая зависимость может быть описана логарифмической функцией, при $a_0 = 0,1$ мм и $h_0 = 0,2$ мм:

$$\Delta \Lambda_{\mu\mu} = 1,442 + 0,288 \cdot \ln(R_{np}), \qquad (3.20)$$

а при $a_{\partial} = 0,2$ *мм* и $h_{\partial} = 0,1$ *мм*:

$$\Delta \Lambda_{\mu\mu} = 0.847 + 0.51 \cdot \ln(R_{np}).$$
(3.21)

Степень деформации сдвига, накопленная при РСО на глубине зарождения трещины, ($\Lambda_{PCO(h)}$) также обнаруживает взаимосвязи с основными параметрами режима (рис. 3.32-3.33). Установлено, что при $h_0 = 0,1$ мм и $R_{np} = 3$ мм:

$$\Lambda_{PCO(h)} = 0,632 \cdot \exp(7,588 \cdot a_{\partial}), \qquad (3.22)$$

при $h_{\partial} = 0,2$ *мм* и $R_{np} = 3$ *мм*:

$$\Lambda_{PCO(h)} = 0,499 \cdot \exp(5,347 \cdot a_{\partial}), \qquad (3.23)$$

при $a_{\partial} = 0, 1$ *мм* и $h_{\partial} = 0, 2$ *мм*:

$$\Lambda_{PCO(h)} = 2,242 \cdot \exp(-0,191 \cdot R_{np}), \qquad (3.24)$$

при $a_{\partial} = 0,2$ *мм* и $h_{\partial} = 0,1$ *мм*:

$$\Lambda_{PCO(h)} = 4,888 \cdot \exp(-0,303 \cdot R_{np}), \qquad (3.25)$$

при *a*_d = *0,05..0,2 мм* и *R*_{np} = *3 мм* (рис. 3.33):

$$\Lambda_{PCO(h)} = 0,605 - 0,334 \cdot \ln(h_{o}).$$
(3.26)

При этом, взаимосвязь указанного параметра на глубине с его значением на поверхности описана параболой (рис. 3.33). При $\Lambda_{PCO} = 2,86$ наблюдается максимальное значение на глубине трещины $\Lambda_{PCO(h)}$:

$$\Lambda_{PCO(h)} = 1,461 - 0,336 \cdot (\Lambda_{PCO} - 2,859)^2.$$
(3.27)



Рис. 3.30. Взаимосвязь ΔA_{III} с $h_{\partial}(R_{np} = 3 \text{ мм}, a_{\partial} = 0, 1..0, 2 \text{ мм})$











Рис. 3.33. Взаимосвязь $\Lambda_{PCO(h)}$ с h_{∂} и Λ_{PCO}

Представленные выше взаимосвязи позволяют определить наследственную зависимость степени деформации сдвига, накапливаемой на стадии ЦД в точке вероятного разрушения, от степени деформации сдвига, накопленной при обработке РСО (рис. 3.34):

$$\Delta \Lambda_{\mu\mu} = 2,246 - 0,39 \cdot \Lambda_{PCO(h)} \,. \tag{3.28}$$

Увеличение действительного зазора резца приводит к уменьшению глубины зарождения усталостной трещины и выходу точки вероятного разрушения на поверхность (рис. 3.35), при $h_0 = 0,1$ *мм* и $R_{np} = 3$ *мм*:

$$h_{mp} = 8,249 \cdot \exp(-20,866 \cdot a_{\partial}). \tag{3.29}$$

Это соответствует представлениям о том, что при дальнейшем увеличении зазора a_{∂} происходит накопление предельных деформаций и разрушение поверхности металла в вершине пластической волны уже при механической обработке.

В то же время увеличение профильного радиуса ролика приводит к увеличению глубины зарождения трещины (рис. 3.36). Установлено, что при $a_{0} = 0,1 \text{ мм}$ и $h_{0} = 0,2 \text{ мм}$:

$$h_{mp} = 0,176 + 1,507 \cdot \ln(R_{np}), \qquad (3.30)$$

при $a_0 = 0,2$ *мм* и $h_0 = 0,1$ *мм*:

$$h_{mp} = -0.998 + 2.225 \cdot \ln(R_{np}). \tag{3.31}$$

Установлено, что при изменении действительного натяга глубина зарождения трещины имеет экстремум, который наблюдается при значениях $h_0 = 0,6 \text{ мм} (R_{np} = 3 \text{ мм}, a_0 = 0,1..0,2 \text{ мм})$ (рис. 3.37):

$$h_{mp} = 4,209 - 10,543 \cdot (h_{o} - 0,6)^{2}; \qquad (3.32)$$

Установленные закономерности позволили определить взаимосвязь глубины зарождения трещины и степени деформации сдвига, накапливаемой на стадии циклической долговечности (рис. 3.38-3.39), а также взаимосвязь h_{mp} с $\Psi_{PCO(h)}$ (рис. 3.40):

$$h_{mp} = 0,002 \cdot \exp(3,7 \cdot \Delta \Lambda_{\mu\mu}), \qquad (3.33)$$

$$\Delta \Lambda_{\mu\mu} = 1,693 + 0,203 \cdot \ln(h_{mp}), \qquad (3.34)$$

$$h_{mp} = 9,245 \cdot \exp(-7,686 \cdot \Psi_{PCO(h)}). \tag{3.35}$$





Рис. 3.34. Взаимосвязь $\Delta \Lambda_{\mu\mu}$ с $\Lambda_{PCO(h)}$



Рис. 3.36. Взаимосвязь *h_{mp}* с *R_{np}*

Рис. 3.35. Взаимосвязь *h_{mp}* с *a*_d



Рис. 3.37. Взаимосвязь *h_{mp}* с *h_d*



h_{тр}, мм 4.0 3,5 0 3,0 2.5 2,0 0 1,5 1,0 0 0,5 C 0,0 -0,5 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 $\Delta\Lambda_{\rm LLD}$

Рис. 3.38. Взаимосвязь $\Delta \Lambda_{III}$ с h_{mp}



Рис. 3.39. Взаимосвязь *h_{mp}* с *ΔA*_{*Ш*}



Рис. 3.40. Взаимосвязь h_{mp} с $\Psi_{PCO(h)}$



Циклическая долговечность, в свою очередь, обнаруживает взаимосвязь с предельной степенью упрочнения поверхностного слоя. Такая взаимосвязь может быть описана экспоненциальной функцией (рис. 3.41):

$$N_{\mu\mu} = (4,02 \cdot 10^{-11}) \cdot \exp(16,16 \cdot \delta_{\mu\mu}).$$
(3.36)

Установлено, что предельная степень упрочнения поверхностного слоя, соответствующая окончанию стадии циклической долговечности, имеет линейную взаимосвязь с накопленной на этой стадии деформацией:

$$\delta_{\mu\mu} = 1,5 + 0,042 \cdot \Delta \Lambda_{\mu\mu} \,. \tag{3.37}$$

Полученные результаты позволили установить взаимосвязи N_{III} с параметрами режима обработки (рис. 3.42). При $R_{np} = 3 \text{ мм}$ и $a_{\partial} = 0,1 \text{ мм}$:

$$N_{IIII} = -9,78 \cdot (h_o - 0,595)^2 + 5,358, \qquad (3.38)$$

при = *3 мм* и *а*₀ = *0*,*05 мм*:

$$N_{IIII} = -10,359 \cdot (h_{\partial} - 0,61)^2 + 6,324$$

(3.39)

при $R_{np} = 3$ *мм* и $h_{\partial} = 0, 1$ *мм*:

$$N_{\mu\mu} = 3,888 \cdot \exp(-2,418 \cdot a_{\partial}), \qquad (3.40)$$

при $R_{np} = 3 \ MM$ и $h_{\partial} = 0,2 \ MM$:

$$N_{\mu\mu} = 4,811 \cdot \exp(-2,418 \cdot a_{\partial}), \qquad (3.41)$$

при *a*_d = *0*,*1 мм* и *h*_d = *0*,*2 мм*:

$$N_{UII} = 2,506 + 1,142 \cdot \ln(R_{np}), \qquad (3.42)$$

при $a_{\partial} = 0,2$ *мм* и $h_{\partial} = 0,1$ *мм*:

$$N_{\mu\mu} = 1,511 + 0,689 \cdot \ln(R_{np}). \tag{3.43}$$



Рис. 3.42. Зависимость N_{ЦД} от основных параметров режима обработки

Анализ результатов показал, что наибольшую циклическую долговечность можно получить, обрабатывая деталь деформирующим роликом наибольшего профильного радиуса, при минимальных значениях действительного зазора резца, с действительным натягом $h_{\partial} = 0,6$ *мм*. Выявленное значение действительного натяга соответствует наибольшей глубине зарождения усталостной трещины, что позволяет установить взаимосвязь последней с длительностью стадии ЦД (рис. 3.43).

$$h_{mp} = 0,1 \cdot \exp(N_{III} - 1,82) \tag{3.44}$$

Результаты исследований позволили установить, что значение $\Psi_{PCO} \approx 0,65$ обеспечивает наибольшую циклическую долговечность упрочненных РСО деталей (рис. 3.44). Так, при $R_{np} = 3 \text{ мм}, a_{\partial} = 0,05 \text{ мм}$:

$$N_{\mu\mu} = -31.5 \cdot (\Psi_{PCO} - 0.65)^2 + 8.218, \qquad (3.45)$$

при $R_{np} = 3$ мм, $a_{\partial} = 0, 1$ мм:

с циклической долговечностью

$$N_{\mu\mu} = -31.5 \cdot (\Psi_{PCO} - 0.65)^2 + 5.342.$$
(3.46)

Полученные результаты согласуются с результатами, установленными А.В. Журавлевым и В.Ю. Блюменштейном для обработки ППД [1,3]. Согласно этим исследованиям, наибольшая циклическая долговечность упрочненных ППД деталей наблюдается при $\Psi_{\Pi\Pi A} \approx 0,8$.



исчерпания запаса пластичности

Анализ представленных взаимосвязей позволяет решить задачу назначения оптимальных режимов обработки, как с точки зрения создания наиболее благоприятного тензора остаточных напряжений, так и с точки зрения обеспечения максимальной циклической долговечности.

По данным авторов [1,3], наибольшее влияние на циклическую долговечность имеет распределение осевой составляющей напряжений в поверхностном слое толщиной 1-2 мм, поэтому решение задачи обеспечения оптимального тензора остаточных напряжений сводится к получению значений осевой составляющей преимущественно максимальных на Таким образом, необходимо поверхности детали. уменьшить спад остаточных напряжений к поверхности детали, который, по мнению автора данной работы, в большей степени вызван воздействием температурных напряжений разгрузки. Некоторый вклад в явление спада ОН вносит также свойственное РСО увеличенное обратное течение металла, вызывающее перераспределение остаточных напряжений в поверхностном слое. Об этом свидетельствуют эпюры OH при обработке PCO с малыми (до 0,3 мм) натягами деформирующих роликов.

На основе аналитических взаимосвязей для осевых напряжений была зафиксирована и оценена динамика поведения осевой составляющей, а именно значений в точках *A*, *B* и *C* при одновременном изменении двух основных факторов: расчетного натяга и профильного радиуса ролика. Условная эпюра №1 иллюстрирует распределение осевых напряжений по глубине поверхностного слоя при наименьших значениях варьируемых факторов, эпюра №3 – соответственно при наибольших значениях (рис. 3.45).

При увеличении значений варьируемых факторов напряжения на поверхности детали перемещаются в направлении сжимающих значений до некоторого предела (точка A_2 , рис. 3.45), а затем вновь смещаются в область растягивающих напряжений. Значения сжимающих напряжений в точке экстремума под поверхностью, а также глубина расположения экстремума

непрерывно возрастают. Общая глубина распространения сжимающих напряжений обнаруживает ту же тенденцию.

Анализируя динамику изменения эпюры осевых напряжений, установили, что оптимальными с позиций формирования остаточных напряжений следует считать режимы обработки, формирующие условную эпюру №2 (рис. 3.45). Такая эпюра имеет максимальные значения на поверхности и в близлежащем слое.



Рис. 3.45. Динамика изменения осевой составляющей остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя при одновременном увеличении *h*_d и *R*_{np} (эпюры 1,2,3 представлены условно)

Таким образом, задача поиска оптимальных режимов обработки с точки зрения создания благоприятного тензора остаточных напряжений сводится к определению сочетания параметров h_{∂} и R_{np} , формирующих максимальные по абсолютным значениям сжимающие напряжения на поверхности.

Было установлено, что такие напряжения на поверхности возникают при сочетании $h_{d} = 0,22 - 0,25$ мм и $R_{np} = 4,5 - 5$ мм.

Указанные значения натяга ролика хорошо согласуются с ранее полученными результатами расчетов оптимальных режимов РСО [1,3]. С позиций обеспечения шероховатости по параметру Ra, оптимальные значения указанных параметров составили $h_{\partial} = 0,25 - 0,3$ мм и $R_{np} = 9$ мм.

С точки зрения обеспечения максимальной циклической долговечности оптимальным режимом обработки на основе представленных выше взаимосвязей является следующее сочетание факторов: $h_{\partial} = 0,6 \text{ мм}, R_{np} \ge 8-9$ *мм*, $a_{\partial} \le 0,05 \text{ мм}$. Такие режимы обработки РСО позволяют повысить циклическую долговечность деталей до $N_{III} = 8-9 \text{ млн}$. циклов, в то время как долговечность неупрочненных образцов составила $N_{III} = 0,5-1 \text{ млн}$. циклов (рис. 3.46).

По данным В.Ю. Блюменштейна, А.В. Журавлева и А.А. Кречетова, для деталей, упрочненных ППД, максимальная ЦД при идентичных условиях нагружения составила $N_{I\!L\!I} = 5-6$ млн. циклов [1,3]. По данным этих же авторов, долговечность неупрочненных образцов составила $N_{I\!L\!I} = 0,5-1,5$ млн. циклов.



Рис. 3.46. Долговечность деталей при использовании ППД и РСО (млн. циклов)

Как показал анализ, максимальная циклическая долговечность при РСО наблюдается при таких режимах обработки, когда остаточные напряжения, глубина и степень упрочнения не достигли своего максимума.

Похожий результат был получен Л.А. Усовым и Л.М. Школьником для упрочненных ППД деталей. Максимальный прирост предела выносливости σ_{-1} был получен авторами при P = 1800 H, значении $\sigma_{ocm} = -400$ МПа и $\delta = 34\%$, в то время как усилие P = 2000 H, позволяет получить $\sigma_{ocm} = -500$ МПа и $\delta = 40\%$ [39].

В результате анализа не выявлено режима обработки, одновременно обеспечивающего высокие значения всех параметров качества. Так для обеспечения максимальной ЦД необходимо использовать ролик наибольшего профильного радиуса, в тоже время для обеспечения высокой степени упрочнения, значение R_{np} должно быть минимально и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения отчетного этапа исследований:

 Выполнено аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки и эксплуатации.

Предложены математические наследственные модели, описывающие накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности по стадиям нагружения, представляющим собой операции резания, поверхностного пластического деформирования (ППД) и последующего эксплуатационного усталостного нагружения. Полученные модели позволяют с научных позиций проводить проектирование упрочняющей технологии на базе основных закономерностей механики технологического наследования. Стадии резания и ППД представлены состоящими из трех этапов квазимонотонной деформации, а формирование поверхностного слоя на каждой из них имеет общие наследственные закономерности. Усталостное нагружение представлено в виде стадии, которая начинается с истории нагружения после упрочняющей обработки и заканчивается моментом полного исчерпания запаса пластичности и появлением видимых дефектов.

Предложен показатель схемы напряженного состояния и проведено моделирование релаксации напряженного состояния И изменения деформированного состояния на стадии циклической долговечности. Показано, что в пределах одного цикла нагружения в поверхностном слое происходят сложные процессы релаксации тензора остаточных напряжений, изменение напряженно-деформированного состояния, неоднократная смена деформации, накопление деформаций И исчерпание знака запаса пластичности. Получены программы нагружения на стадии циклической долговечности в зависимости от истории нагружения.

Показано, что каждое следующее нагружение приводит к пластическому течению металла в очаге деформации и релаксации остаточных напряжений от предшествующей стадии нагружения.

Окончательное (наследуемое) остаточное напряженное состояние будет зависеть от истории нагружения, определяемой характером накопления пластической деформации во времени.

2. Разработаны аналитические моделей программ нагружения (ΠH) имеющих значительное количество участков квазимонотонной деформации. Предложены правила технологического наследования, основанные на закономерностях формирования и трансформации программ нагружения поверхностного слоя деталей. Построение программ нагружения проведено с использованием комплекса начальных и граничных условий формирования очагов деформации при резании, ППД и циклическом нагружении в наследственной постановке. Предложено описание формирования И трансформации состояния поверхностного слоя в терминах и категориях программ нагружения, выделяемых на каждой операции механической обработки или эксплуатации как стадиях нагружения. Программы нагружения описывают накопление деформации в условиях изменяющихся схем наследуемого напряженного состояния металла поверхностного слоя в очаге пластической деформации. Стадии нагружения выделяются по признакам завершенности программ нагружения и разбиваются на ряд этапов квазимонотонной деформации. которые определяют закономерности накопления и залечивания дефектов в поверхностном слое детали.

Для стадий резания, поверхностного пластического деформирования и усталостного нагружения предложены системы аналитических моделей, описывающих формирование и трансформацию ПН под воздействием режимов обработки и эксплуатации на основе учета истории нагружения. Оценка ПН проводится на основе расчета напряженно-деформированного состояния очага деформации вдоль линий тока, формирующих состояние поверхностного слоя детали.

3. Разработано аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях упрочняющей обработки и эксплуатации.

Представлена аналитическая модель процесса формирования И выполнены аналитические расчеты остаточных напряжений на стадиях упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием и размерным совмещенным обкатыванием с учетом явления технологического наследования. Ключевой особенностью ЭТОГО решения является представление остаточных напряжений в виде тензора, составляющими элементами которого являются упруго-пластические напряжения OT нагрузки, идеально-упругие и тепловые напряжения разгрузки. Установлены закономерности распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя детали.

Представлена аналитическая модель процесса трансформации остаточных напряжений поверхностного слоя на стадии циклического эксплуатационного нагружения. Ключевой особенностью этого решения является представление о непрерывной релаксации тензора остаточных напряжений в процессе эксплуатационного нагружения на стадии циклической долговечности.

Установлены закономерности формирования осевых, радиальных, окружных и касательных остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя. Выявлено, что в широком диапазоне варьируемых факторов наибольшими значениями сжимающих напряжений характеризуется осевая составляющая, для остальных компонент характерен меньший диапазон изменения. Установлено влияние режимов обработки на формирование составляющих тензора остаточных напряжений.

Установлено, что размерное совмещенное обкатывание обеспечивает высокую циклическую долговечность упрочненных деталей в условиях многоциклового усталостного нагружения, достигающую 8 млн. циклов. Выявленные значения циклической долговечности в 3,5 раза превышают долговечность не упрочненной детали и в 1,5 раза – долговечность детали, упрочненной поверхностным пластическим деформированием. Выявлено, что в поверхностном слое детали существует точка зарождения усталостной

трещины (точка вероятного разрушения), в которой происходит накопление предельных деформаций и полное исчерпание запаса пластичности по окончании стадии циклической долговечности. Глубина точки зарождения усталостной трещины определяется условиями упрочняющей обработки: режимами обработки, накоплением деформаций и исчерпанием запаса пластичности металла. С увеличением профильного радиуса ролика значение глубины зарождения трещины возрастает, а с увеличением действительного зазора резца – уменьшается.

Установлено обработки влияние режимов упрочняющей И наследуемых параметров механического состояния металла поверхностного слоя на циклическую долговечность детали. Результаты исследований циклическая долговечность показали, ЧТО детали определяется накопленными деформациями, исчерпанием пластичности, запаса остаточными напряжениями, которые, в свою очередь, определяются обработки. упрочняющей Выявлено, наибольшую режимами что циклическую долговечность детали обеспечивает исчерпание запаса пластичности $\Psi \approx 0,65$.

Полученные результаты позволяют составить новое целостное представление о закономерностях формирования и трансформации свойств поверхностного слоя деталей машин в наследственной постановке. В совокупности полученные результаты представляют собой новую теорию формирования поверхностного слоя деталей машин, имеющую применение к большинству процессов механической обработки со снятием и без снятия стружки и последующей эксплуатации в условиях приложения циклических нагрузок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

 Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.: ил.

 Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

 Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн,
 В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.: ил.

4. Грешнов В.М., Лавриненко Ю.А., Напалков А.В. Инженерная физическая модель пластичности деформируемых металлов (скалярное соотношение).//Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. - № 5. – С. 3 – 6.

5. Грешнов В.М., Лавриненко Ю.А., Напалков А.В. Инженерная физическая модель эффекта Баушингера и определяющие уравнения изотропного материала с анизотропным упрочнением (тензорное соотношение).//Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. - № 6. – С. 3 – 6.

6. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. - М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.: ил.

7. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. - Л.: Машиностроение, 1988. – 252 с.: ил.

 Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.

Поведение стали при циклических нагрузках / Под ред. В. Даля.
 Пер с нем. Под ред. В.Н. Геминова. – М.: Металлургия, 1982. – 568 с.

Блюменштейн В.Ю. Функциональная модель механики технологического наследования// Вестник КузГТУ. - 2000. - № 4. – С. 46 - 54.

11. V.J. Blyumenshtein. Technological Inheritance Mechanics. The exhaustion of plasticity resource while cutting./ International Conference "Fundamental and Applied technological Problems of Machine Building" "Technology - 2000". 28-30 September. Oryol, Russia. P. 111-114.

12. Сосновский Л. А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л. А. Сосновский. - Минск: Наука и техника, 1987. - 288 с.

Иванова В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Φ.
 Терентьев. - М.: Металлургия, 1975. - 455 с.

14. Иванова В. С. Разрушение металлов / В. С. Иванова. - М.: Металлургия, 1979. - 168 с.

15. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов / В. Φ. Терентьев. - М.: Наука, 2003. - 254 с.: ил.

16. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. - 232 с.: ил.

17. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб.
пособие для вузов / Ю. Н. Работнов. - 2-е изд., испр. - М.: Наука, гл. ред. физ.
- мат. лит., 1988. - 712 с.

18. Гребеник В.М., Потапов В.С., Кучеренко В.Ф. Выбор оптимальных режимов при поверхностном механическом упрочнении стальных деталей. // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1982. - № 1. - С. 42 - 43.

19. Жасимов М.М. Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 209 с.: ил.

20. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – Киев, Вища школа, 1983. – 176 с.

21. Баринов В.В. Влияние технологических факторов на уровень поврежденности поверхностного слоя деталей при обкатывании: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – М.: 1984. – 187 с.: Библиогр.: с. 163-172.

22. Смелянский В.М., Баринов В.В. Оценка параметров качества ППД обработки поверхностного слоя деталей после на основе деформационного критерия // Межвуз. сб.: Высокопроизводительные технологические процессы повышения функциональных параметров автомобиля. – М.: МАМИ, 1984. – С. 3-16.

23. Калпин Ю.Г., Смелянский В.М., Крючковский В.М. Пластичность металлов при немонотонном деформировании. - В сб.: Машины и автоматизация кузнечно - штамповочного производства. - М.: ВЗМИ, 1988. - С.138 - 146.

24. Коновалов Е.Г., Пятосин Е.М., Армадерова Г.Б. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния материала при поверхностном пластическом деформировании роликовым инструментом.//Вестник АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1973. - № 1. – С. 9-12.

25. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. – М.: Гос. изд-во техн. - теорет. лит-ры, 1953. – 788 с.; ил.

26. Технологические остаточные напряжения / Под ред. А.В. Подзея.- М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.

27. Овсеенко А. Н. Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами / А. Н. Овсеенко, М. М. Gajek, В. И. Серебряков. – Opole: Politechnika Opolska, 2001. – 228 с.

28. Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.

29. Чоудхури Мд. Н. Абсар. Разработка расчетной модели формирования остаточных напряжений и методики их технологического обеспечения при обработке деталей обкатыванием и выглаживанием : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. - М., 1988. – 200 с.

30. Блюменштейн В. Ю. Исследование качества поверхностного слоя деталей машин после размерного совмещенного обкатывания : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. - М., 1979. – 254 с.

31. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб.
пособие для вузов / Ю. Н. Работнов. - 2-е изд., испр. - М.: Наука, гл. ред. физ.
- мат. лит., 1988. - 712 с.

32. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. - М.: Машиностроение, 1978. - 152 с.

33. Каледин Б. А. Повышение долговечности деталей машин поверхностным деформированием / Б. А. Каледин, П. А. Чепа. - Минск: Наука и техника, 1974. - 232 с.

34. Браславский В. М. Технология обработки крупных деталей машин / В. М. Браславский. - М.: Машиностроение, 1975. - 160 с.

35. Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении / И. В. Кудрявцев. - М.: Машгиз, 1951. - 280 с.

36. Кудрявцев И. В. Усталость крупных деталей машин / И. В. Кудрявцев, Н. Е. Наумченко, Н. М. Саввина. - М.: Машиностроение, 1981. - 238 с.: ил.

37. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. - М.: Машиностроение, 1971. - 200 с.

38. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации : справочник / В. А. Кроха. - М.: Машиностроение, 1980. - 157 с.: ил.

39. Усов Л. А. Упрочнение галтелей шеек осей роликами с поворачивающейся осью вращения / Л. А. Усов, Л. М. Школьник // Поверхностные методы упрочнения металлов и сплавов в машиностроении. - МДНТП. - 1983. - С. 124-129.