

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 _____/ Е.К. Ещин/ М.П. |

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 2 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 научно-педагогические 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
2011 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

без ученой степени, _____ Зенков А. А.
без ученого звания _____
подпись, дата

Реферат

Отчет 113 с., 2 ч., 90 рис., 1 табл., 18 источн., 0 прил.

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ , ПРОГРАММА НАГРУЖЕНИЯ , УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА , ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ , ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ , ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ , ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 2 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

При моделировании закономерностей технологического наследования состояния металла поверхностного слоя использовался метод конечных элементов, основными достоинствами которого являются универсальность и высокая точность получаемых решений. При приготовлении металлографических шлифов использовался малодеформационный метод электроэрозионной резки, достоинством которого является малое механическое и термическое влияние на структурное состояние и свойства

исследуемого металла.

Теоретические и экспериментальные исследования и аналитическое описание закономерностей проводились с использованием программной системы «Ansys», которая позволяет выполнять конечно-элементное моделирование различных объектов с высокой степенью достоверности при условии корректной постановки задачи и обеспечить требуемую достоверность полученных результатов. Реализация в программной системе «Ansys» алгоритмов численного решения систем уравнений для оценки напряженно-деформированного состояния позволила получить решения с минимальной погрешностью.

Материалы теоретических и экспериментальных исследований, раскрывающие содержание работ по решению поставленных научно-исследовательских задач, включая:

1. Результаты исследования закономерностей технологического наследования наноструктурного состояния поверхностного слоя под действием программ нагружения интенсивной пластической деформации.
2. Методики приготовления металлографических шлифов.

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|---|------|
| Титульный лист | 1 |
| Список исполнителей | 2 |
| Реферат | 3 |
| Содержание | 5 |
| Введение | 6 |
| Теоретические исследования закономерностей технологического наследования наноструктурного состояния | |
| 1. поверхностного слоя под действием программ нагружения интенсивной пластической деформации на стадиях изготовления и эксплуатации | 8 |
| 1.1. Исследования закономерностей технологического наследования наноструктурного состояния и механических свойств поверхностного слоя под действием интенсивной пластической деформации | 8 |
| 1.1.1. Моделирование интенсивной пластической деформации при упрочняющей обработке поверхностного слоя роликами специальных профилей | 8 |
| 1.1.2. Описание закономерностей технологического наследования и механических свойств поверхностного слоя при упрочняющей обработке поверхностного слоя роликами специальных профилей | 35 |
| 1.2. Разработка аналитических моделей программ нагружения, обеспечивающих большое значение накопленной степени деформации сдвига при докритических значениях степени исчерпания запаса пластичности | 67 |
| 1.2.1. Модели программ нагружения, обеспечивающие интенсивную пластическую деформацию поверхностного слоя без его разрушения | 67 |
| 1.2.2. Результаты аналитических исследований влияния программ нагружения интенсивной пластической деформации на формирование и трансформацию состояния поверхностного слоя | 98 |
| 2. Приготовление металлографических шлифов | 106 |
| 2.1. Методика пробоподготовки образцов для проведения исследований методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии | 106 |
| 2.2. Методика пробоподготовки для проведения металлографии образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации кручением со сжатием | 108 |
| Заключение | 109 |
| Список использованных источников | 112 |

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день общепринятым является представление о трансформации структуры металла в наноразмерное состояние (с 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 эксплуатационных 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 процессов, происходящих на стадиях комбинированной упрочняющей 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 др. Инженерные приложения деформационного наноструктурирования для повышения эксплуатационных 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 выполнены теоретические исследования закономерностей технологического наследования наноструктурного состояния поверхностного слоя под действием программ нагружения интенсивной пластической деформации.

Получены результаты моделирования интенсивной пластической деформации при упрочняющей обработке поверхностного слоя роликами специальных профилей.

Выявлено влияние программ нагружения интенсивной пластической деформации на формирование и трансформацию состояния поверхностного слоя.

Для проведения дальнейших экспериментальных исследований в рамках последующих этапов проекта по представленным методикам приготовлены металлографические шлифы с целью проведения их металлографии, а также исследований методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОГРАММ НАГРУЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТАДИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОГРАММ НАГРУЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

1.1. Исследования закономерностей технологического наследования наноструктурного состояния и механических свойств поверхностного слоя под действием интенсивной пластической деформации

1.1.1. Моделирование интенсивной пластической деформации при упрочняющей обработке поверхностного слоя роликами специальных профилей

В рамках проведения исследований осуществлялось моделирование упрочняющей обработки поверхностного слоя поверхностным пластическим деформированием с применением роликов специального профиля. В настоящее время проводится подготовка документов к патентованию конструкции данных роликов.

При моделировании напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя использовались 3 основных типа роликов специального профиля.

1-й тип профиля представлял собой комбинацию 4-х последовательно расположенных инденторов, расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении (рис. 1.1).

Деформирующий элемент (ДЭ) первым входящий в контакт с поверхностным слоем имел профильный радиус $R_{np} = 1$ мм и двигался относительно поверхности с действительным натягом $h_o = 0,05$ мм.

Второй деформирующий элемент также имел профильный радиус $R_{np} = 1$ мм и имел радиальное смещение относительно 1-ого элемента в направлении от оси ролика на величину 0,05 мм. Таким образом, действительный натяг 2-го элемента относительно поверхности составил $h_o = 0,10$ мм.

Третий деформирующий элемент, как и предыдущие, имел профильный радиус $R_{np} = 1$ мм и имел радиальное смещение относительно 2-ого элемента в направлении от оси ролика на величину 0,05 мм. Таким образом, действительный натяг 3-го элемента относительно поверхности составил $h_o = 0,15$ мм.

Четвертый деформирующий элемент имел профильный радиус $R_{np} = 3$ мм и имел радиальное смещение относительно 3-ого элемента в направлении к оси ролика величиной 0,1 мм. Таким образом, действительный натяг 4-го, также как и 1-ого элемента относительно поверхности составил $h_o = 0,05$ мм.

Расстояние между вершинами 1-ого и 2-го ДЭ составило 1,855 мм, между вершинами 2-ого и 3-его ДЭ - 1,84 мм, между вершинами 3-его и 4-го ДЭ - 3,2 мм.

2-й тип профиля представлял собой комбинацию деформирующего элемента профильного радиуса $R_{np} = 3$ мм и цилиндрической части, расположенной относительно вершины деформирующего элемента с зазором 0,15 мм (рис. 1.2).

Деформирующий элемент внедрялся в поверхностный слой детали с действительным натягом $h_o = 0,05$ мм. Таким образом, зазор между

цилиндрической частью и исходной (необработанной) поверхностью составил 0,1 мм.

Предварительные расчеты показали, что высота волны в случае обработки традиционным ППД с такими же параметрами режима ($R_{пр} = 3$ мм, $h_0 = 0,05$ мм) для стали 45 составляет 0,15...0,2 мм. Таким образом, зазор между цилиндрической частью и исходной (необработанной) поверхностью заполнялся деформированным металлом, на который оказывалось дополнительное деформационное воздействие.

3-й тип профиля представлял собой комбинацию 2-х близкорасположенных инденторов, имеющих относительно друг друга некоторое смещение в радиальном направлении (рис. 1.3).

Деформирующий элемент первым входящий в контакт с поверхностным слоем имел профильный радиус $R_{np} = 1$ мм и двигался относительно поверхности с действительным натягом $h_0 = 0,02$ мм.

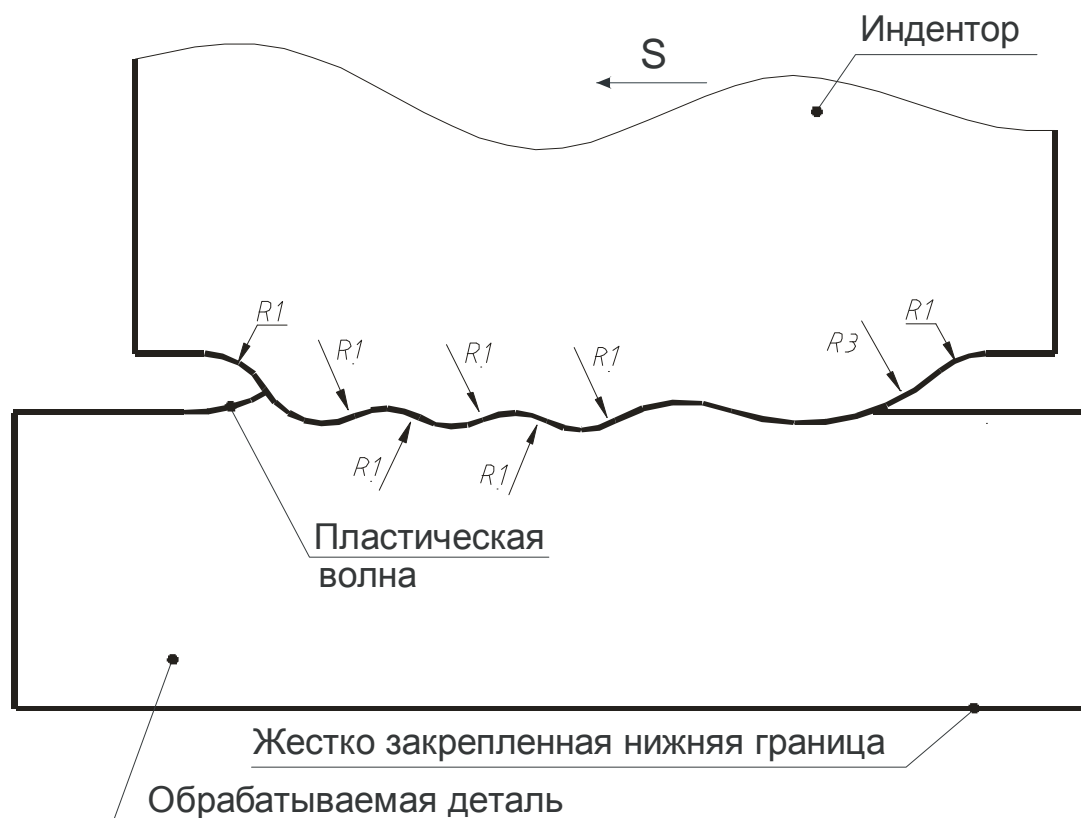


Рис. 1.1. Постановка конечно-элементного моделирования обработки роликом специального профиля 1-ого типа

Второй деформирующий элемент также имел профильный радиус $R_{np} = 1$ мм и имел смещение относительно 1-ого элемента в радиальном направлении на величину 0,03 мм. Таким образом, действительный натяг 2-го элемента относительно поверхности составил $h_0 = 0,05$ мм.



Рис. 1.2. Постановка конечно-элементного моделирования обработки роликом специального профиля 2-ого типа

Расстояние между вершинами деформирующих элементов составило 0,733 мм. Вследствие этого, волна деформированного металла, возникающая от воздействия второго деформирующего элемента, располагалась в задней зоне очага пластической деформации, созданного первым деформирующим элементом.

Для определения компонентов напряженно-деформированного состояния использовался метод конечных элементов (МКЭ), сущность которого заключается в разбиении моделируемого тела на конечные элементы и составлении систем уравнений из условия равновесия приложенных внешних сил и реакции системы конечных элементов. Решение сформированной системы уравнений позволяет получить перемещения и компоненты напряженно-деформированного состояния в узлах конечно-

элементной модели. Основными достоинствами метода конечных элементов являются его универсальность и высокая точность полученных решений.

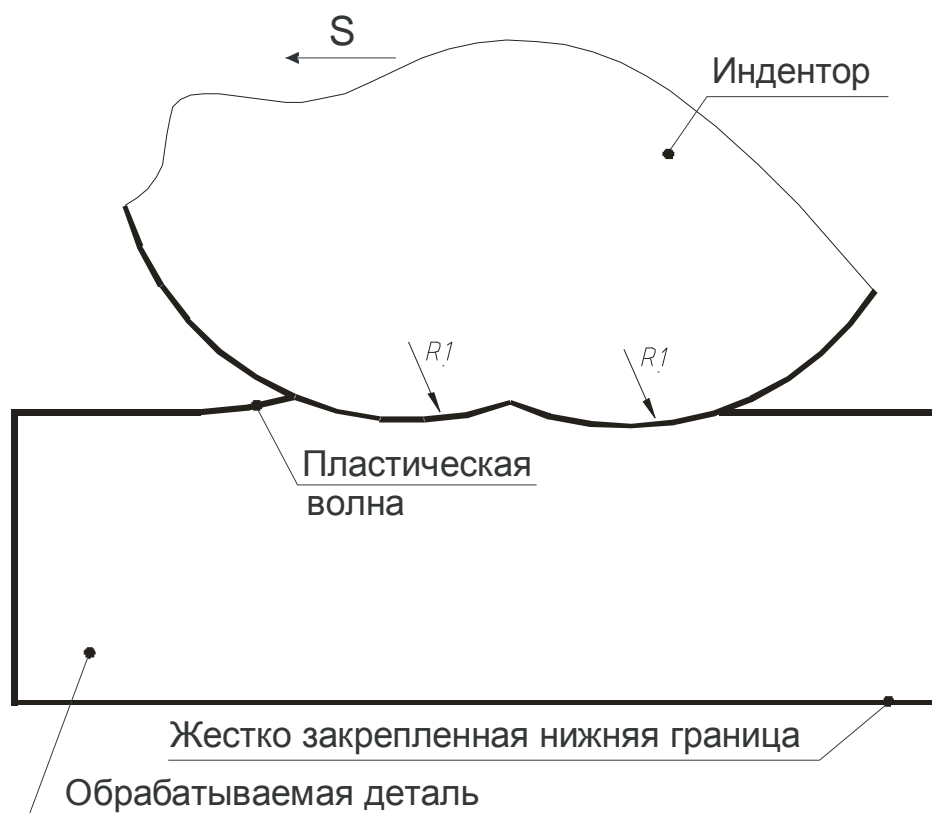


Рис. 1.3. Постановка конечно-элементного моделирования обработки роликом специального профиля 3-ого типа

В соответствии с принятыми постановками моделирования создавались конечно-элементные модели, состоящие из обрабатываемой детали и внедряемого в нее ролика специальной формы. Деталь моделировалась как упругопластическое тело, а ролик – как абсолютно жесткое [1].

Верхняя граница модели обрабатываемой заготовки представляла собой контур очага деформации, построенный по форме профиля ролика.

Нижняя граница модели жестко закреплялась по осям x и y . Ролику придавалось смещение по оси x на величину подачи S .

Задача решалась в плоско-деформированной постановке. Это предполагало, что все деформационные процессы в ОД, происходят в

плоскости продольного сечения, проходящей через ось вращения обрабатываемой детали (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 [2-3]:

- 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.

Плоско-деформированная постановка предполагает, что деформации возникают только в рассматриваемой плоскости, а тензор напряжений является условно объемным [4].

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:

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

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 XU :

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

Начальными и граничными условиями для моделирования являлись физические и механические свойства металла: модуль Юнга E , плотность ρ , коэффициент Пуассона ν , коэффициент трения η , кривая течения $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, диаграмма пластичности $A_p = A_p(\Pi)$, режим упрочняющей обработки, а также форма и геометрические размеры очага деформации, возникающего от воздействия инденторов (табл. 1.1).

В процессе исследований кривая течения аппроксимировалась по 2-м схемам: мультилинейной и билинейной.

Исследования показали, что использование мультилинейной аппроксимации кривой течения существенно не повысило качество результатов моделирования, однако привело к увеличению времени решения задачи.

Таблица 1.1

Физические и механические свойства металла, параметры кривой течения (сталь 45)

| | | |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Модуль Юнга | E , МПа | 2×10^{11} |
| Плотность | ρ , кг/м ³ | 7800 |
| Коэффициент Пуассона | ν | 0,3 |
| Коэффициент трения | η | 0,21 |
| Экстраполированный предел текучести | $\sigma_{эм}$, МПа | $3,66 \times 10^8$ |
| Тангенциальный модуль | $T_{мод}$, МПа | $2,596 \times 10^6$ |

Таким образом, кривая течения материала аппроксимировалась двумя прямыми линиями (билинейная аппроксимация) (рис. 1.4). Для такого описания необходимо знать три параметра: модуль Юнга E , характеризующий угол наклона упругого участка α , экстраполированный предел текучести $\sigma_{эм}$, соответствующий отрезку на оси напряжений, определяемому продолжением участка пластического течения;

тангенциальный модуль T_{mod} , характеризующий угол наклона участка пластического течения β (табл. 1.1).

Дискретность разбиения конечно-элементной модели определяет качество получаемых при КЭ-моделировании результатов. Кроме этого, важное значение имеет распределение элементов по пространству обрабатываемой детали.

При решении поставленных задач РСО разбиение производилось таким образом, что количество конечных элементов достигало **50000**, при этом наибольшую концентрацию элементов модель имела непосредственно в зоне пластического течения металла в очаге деформации.

Такое количество и распределение элементов позволило с высокой достоверностью определить параметры напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя.

Дальнейший рост количества элементов несколько увеличивает точность результатов, однако при этом существенно возрастает время, затрачиваемое на решение задачи.

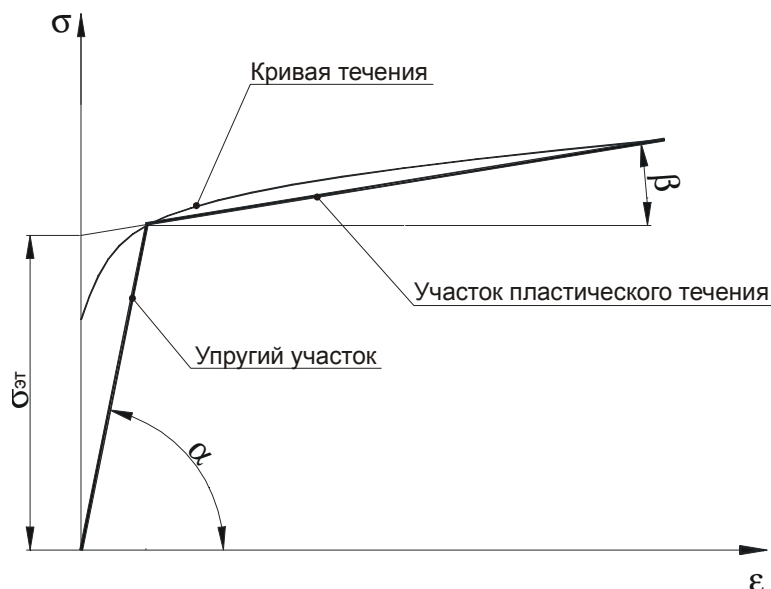


Рис. 1.4. Билинейная аппроксимация кривой течения

В процессе моделирования механики РСО рассматривались различные варианты постановки задачи.

В первом случае поверхность детали моделировалась с очагом деформации, а при нагружении индентор смещался вдоль оси x на величину подачи, которая составляла $S = 0,1$ мм (рис. 1.5, а).

Второй вариант постановки задачи также предполагал моделирование детали с очагом деформации. При этом, индентор предварительно смещался относительно очага деформации вдоль обеих осей на величину подачи $S = 0,1$ мм. При нагружении индентор смещался вниз на величину $S = 0,1$ мм (рис. 1.5, б).

В третьем случае поверхность детали моделировалась без очага деформации. При нагружении индентор внедрялся в деталь на величину натяга h_0 , значение которого варьировалось в зависимости от формы профиля индентора (1-й ход), а затем смещался вдоль оси x на величину подачи, которая составляла $S = 0,1$ мм (2-ой ход) (рис. 1.5, в).

4-ый и 5-ый варианты постановки задачи предполагали моделирование детали без очага деформации. При нагружении индентор внедрялся в деталь на величину натяга h_0 (4-ый вариант) (рис. 1.5, г). 5-ый вариант предполагал приложение к индентору усилия вдоль оси y величиной 200...300 кгс (рис. 1.5, д).

Таким образом, для каждого из 3-х типов профиля результаты моделирования были получены в пяти различных постановках.

Предварительный анализ показал несостоятельность двух последних вариантов постановки задачи.

Результаты, полученные в 1-ой, 2-ой и 3-ей постановках весьма близки друг к другу как по характеру распределения, так и по численным значениям компонент напряженно-деформированного состояния. Расхождение составляет не более 15-20%.

Ниже приведены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния, полученные в первой постановке задачи (рис. 1.5, а).

В результате конечно-элементного моделирования были получены:

- координаты узлов КЭ-модели (x, y) , значения перемещений в этих узлах:

$$[U]_{xyz} = \begin{pmatrix} U_x & 0 & 0 \\ 0 & U_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1.3)$$

- распределения компонент тензора напряженного состояния (1.1), главных напряжений:

$$[T\sigma]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}, \quad (1.4)$$

а также распределения компонент тензора относительных деформаций (1.2), возникающих при обработке.

Однако для получения представлений о характере распределения напряжений, кинетике накопления деформации и исчерпания запаса пластичности необходимо определить координаты точек линий тока металла в поверхностном слое детали, пересчитать полученные параметры напряженно-деформированного состояния из узловых точек конечно-элементной модели в точки линий тока и рассчитать параметры механического состояния в этих точках.

Для решения задачи пересчета полученных параметров НДС из узловых точек конечно-элементной модели в точки линий тока и расчета параметров механического состояния в этих точках был адаптирован и использован алгоритм, разработанный В.М. Смелянским и реализованный в виде программного продукта А.А. Кречетовым и В.Ю. Блюменштейном. Данный алгоритм включает [2,5-7]:

1. Определение координат точек линий тока на основе смещений узлов конечно-элементной модели, обусловленных пластическим течением металла;

2. Перерасчет параметров напряженно-деформированного состояния, полученных методом конечных элементов, из узлов конечно-элементной модели в точки линий тока;

3. Расчет показателей механического состояния вдоль линий тока и по глубине упрочненного ПС детали.

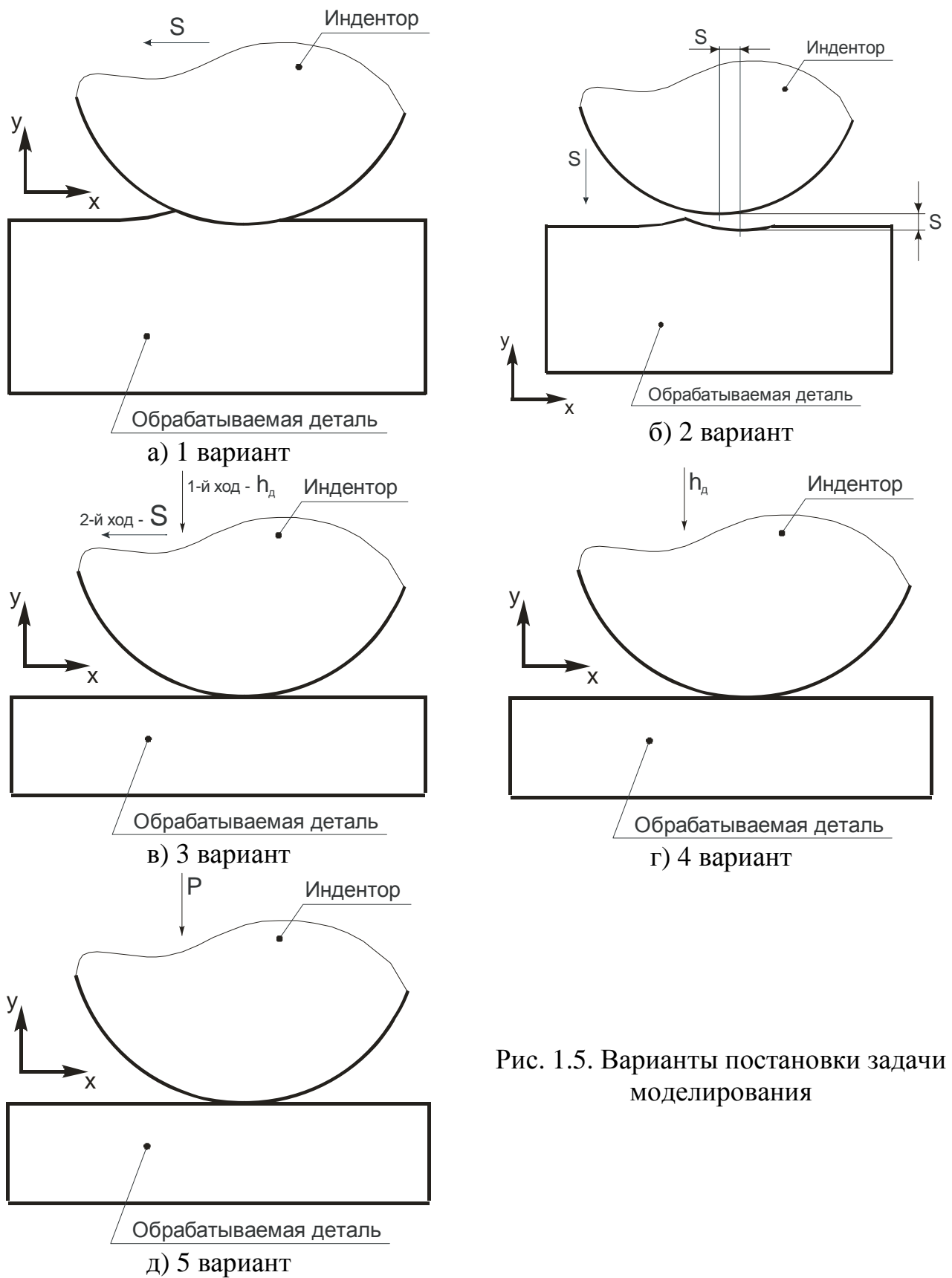


Рис. 1.5. Варианты постановки задачи моделирования

Согласно данному алгоритму, смещение материальной точки поверхностного слоя относительно индентора складывается из двух составляющих: смещения на величину подачи и смещения, вызываемого пластическим течением металла в очаге деформации. Последнее рассчитывалось на основе смещений соседних узлов. определялись четыре ближайших узла конечно-элементной модели к рассматриваемой материальной точке i , каждый из которых лежал в отдельной четверти координатной плоскости (рис. 1.6).

Условиями для определения координат ближайших узлов являлись:

$$\begin{aligned}
 &x_i < x_1; y_i < y_1; \min(\sqrt{(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2}); \\
 &x_i > x_2; y_i < y_2; \min(\sqrt{(x_2 - x_i)^2 + (y_2 - y_i)^2}); \\
 &x_i > x_3; y_i > y_3; \min(\sqrt{(x_3 - x_i)^2 + (y_3 - y_i)^2}); \\
 &x_i < x_4; y_i > y_4; \min(\sqrt{(x_4 - x_i)^2 + (y_4 - y_i)^2}).
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

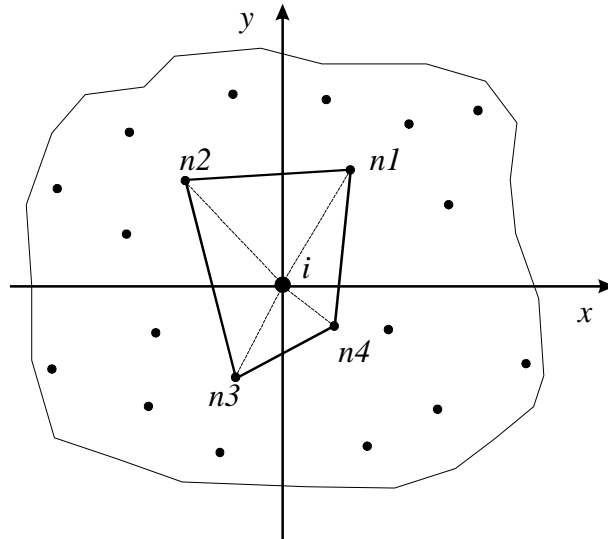


Рис. 1.6. Ближайшие узлы конечно-элементной модели к точке i

Таким образом, вокруг рассматриваемой точки образовывалась четырехугольная ячейка, в вершинах которой известны значения смещений, обусловленные пластическим течением металла. Предполагалось, что вдоль

линий $n1-n2$ и $n3-n4$ распределение искомого параметра (в данном случае смещения U) являлось линейным, т.е. $U = kx + b$ (рис. 1.7).

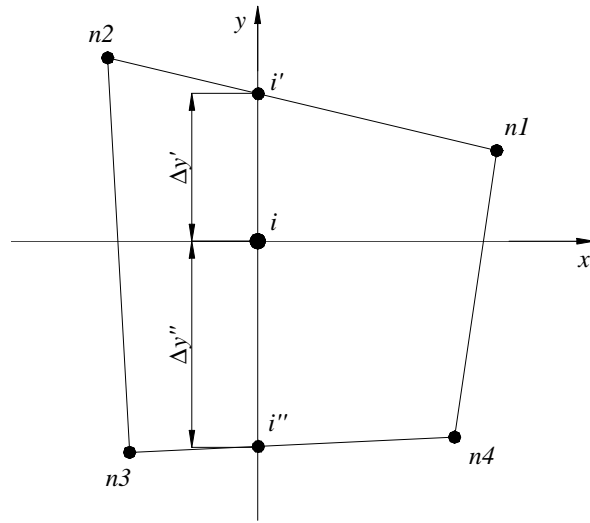


Рис. 1.7. К определению какого-либо параметра в точке i

При известных величинах U и координат x узлов $n1-n4$ находились величины коэффициентов k_{1-2} , b_{1-2} , k_{3-4} и b_{3-4} :

$$k_{n-m} = \frac{U_n - U_m}{x_n - x_m}, \quad (1.6)$$

$$b_{n-m} = U_n - k_{n-m}x_n. \quad (1.7)$$

По координате x_i точки линии тока определялись значения параметра на линиях $n1-n2$ и $n3-n4$ в точках i' и i'' соответственно. Далее, по конечноразностным соотношениям находилось смещение непосредственно в точке i :

$$U = \frac{\Delta y'' U_{1-2} + \Delta y' U_{3-4}}{\Delta y' + \Delta y''}. \quad (1.8)$$

После определения координат точек линий тока определялись значения компонентов тензоров напряжений и деформаций в этих точках по известным значениям в узлах конечно-элементной модели. Алгоритм определения параметров напряженно-деформированного состояния

аналогичен поиску смещений, обусловленных пластическим смещением в точке линии тока.

Итогом выполнения этого этапа являлось распределение компонент тензоров напряжений $[T\sigma_{ij}]$ и относительных деформаций $[T\varepsilon_{ij}]$ вдоль линий тока в очаге деформации.

По полученным значениям параметров напряженно-деформированного состояния в точках линий тока выполнили расчет характеристик механического состояния поверхностного слоя вдоль линий тока в очаге деформаций:

1. Среднее нормальное напряжение σ :

$$\sigma = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}; \quad (1.9)$$

2. Интенсивность касательных напряжений t :

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{|I_2(D_\sigma)|} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}; \end{aligned} \quad (1.10)$$

3. Показатель схемы напряженного состояния Π :

$$\Pi = \frac{\sigma}{T}; \quad (1.11)$$

4. Тензор скоростей деформации $[T\xi_{i,j}]$;

5. Интенсивность скоростей деформаций сдвига H :

$$\begin{aligned} H &= 2\sqrt{|I_2(D_\xi)|} = \\ &= \sqrt{\left((\xi_{xx} - \xi_{yy})^2 + (\xi_{yy} - \xi_{zz})^2 + (\xi_{zz} - \xi_{xx})^2 \right) \frac{2}{3} + 4(\xi_{xy}^2 + \xi_{yz}^2 + \xi_{zx}^2)}; \end{aligned} \quad (1.12)$$

6. Накопленная степень деформации сдвига Λ :

$$\Lambda = \int H dt; \quad (1.13)$$

По диаграмме пластичности и найденному показателю схемы определили предельную степень деформации сдвига Λ_p :

$$\Lambda_p = f(\Pi), \quad (1.14)$$

где Π – показатель схемы напряженного состояния, а по степени деформации сдвига и предельной степени деформации сдвига – степень исчерпания запаса пластичности Ψ по критерию Калпина-Филлипова:

$$\Psi = \int_0^{\Lambda_k} \left[n\varphi_0\Lambda_i^{n-1} + (1 - \varphi_0\Lambda_p^n(\Pi)) \frac{1}{\Lambda_p(\Pi)} \right] d\Lambda_i. \quad (1.15)$$

Полученные характеристики механического состояния поверхностного слоя вдоль линий тока позволили определить распределение накопленных параметров состояния по глубине поверхностного слоя.

Для автоматизированного расчета указанных параметров использовалась программа «Наследственная механика поверхностного слоя деталей машин», реализующая вышеописанный алгоритм [7].

В качестве исходной информации для работы программы выступают результаты конечно-элементного моделирования: номера и координаты узлов конечно-элементной модели, значения компонент перемещений, напряжений, главных напряжений и общих деформаций в этих узлах. Узлы индентора за ненадобностью в дальнейшем расчете не используются.

Помимо этого, для осуществления расчета задаются: подача по оси x , (мм) (при движении индентора справа налево, значение должно быть отрицательным), частота вращения шпинделя (об/мин) и марка материала.

В процессе работы программа рассчитывает координаты точек линий тока и определяет распределения компонент напряжений, накопленных параметров механического состояния как вдоль линий тока, так и по глубине поверхностного слоя (рис. 1.8).

По окончании расчета имеется возможность сохранения результатов в формате Microsoft Excel.

В результате конечно-элементного моделирования для роликов всех типов получены распределения компонент напряжений и деформаций, возникающих при обработке. Полученные распределения позволили сформировать представления о закономерностях процессов, протекающих в

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

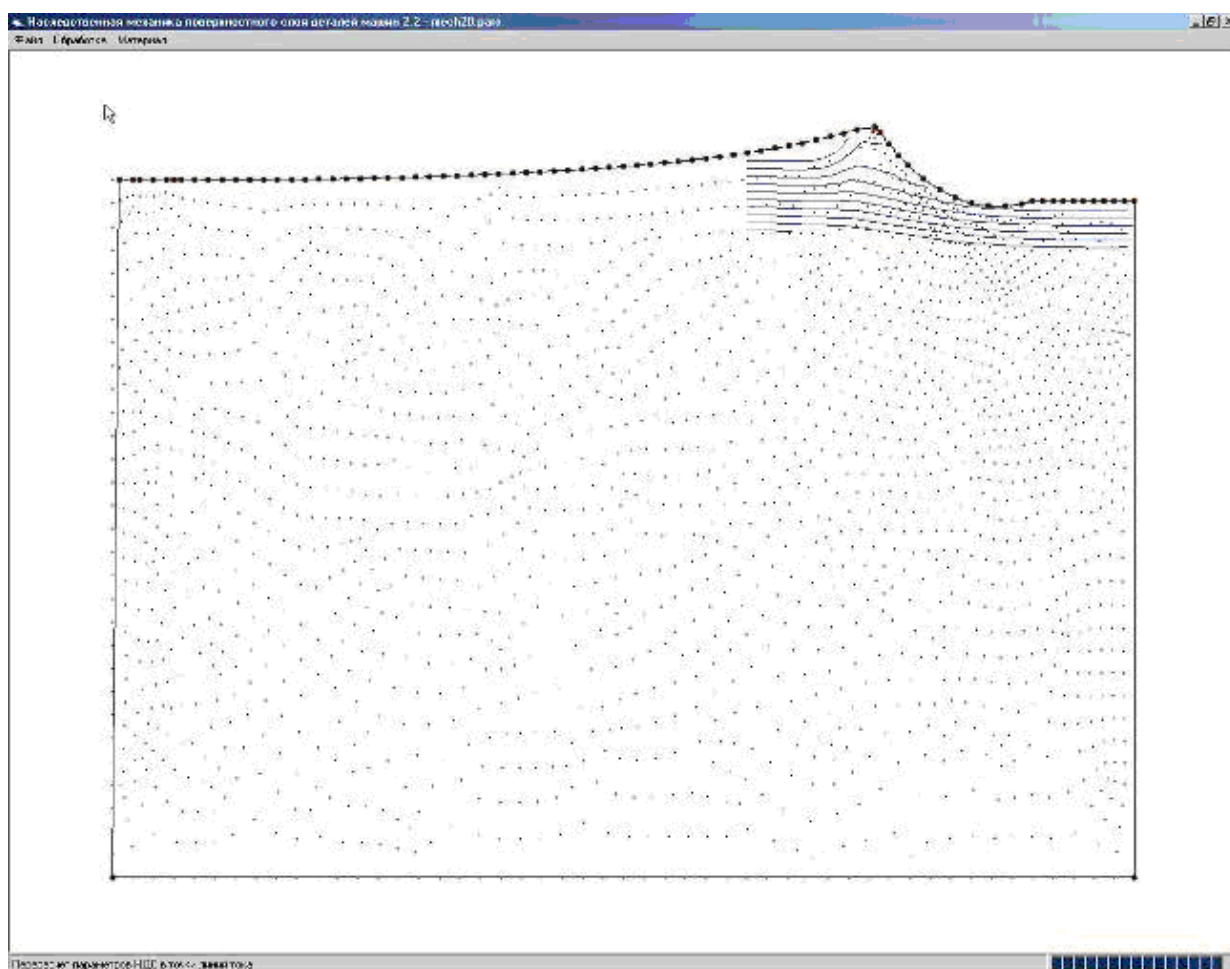


Рис. 1.8. Окно определения координат и расчета параметров механического состояния в точках линий тока [7]

Для получения представлений о кинетике накопления деформации и исчерпания запаса пластичности на основе использования описанного выше алгоритма, были определены координаты точек линий тока (ЛТ), в которых рассчитаны параметры напряженно-деформированного состояния [2,5].

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 A_p , а по степени деформации сдвига и A_p - степень исчерпания запаса пластичности Ψ .

Наибольший интерес представляет рассмотрение параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации вдоль линии тока, формирующей поверхность детали.

Картина напряженно-деформированного состояния для ролика **с 1-ым типом специального профиля** представлена на рис. 1.9 - 1.10.

Установлено, что наибольшие сжимающие напряжения (рис. 1.9, а-г) по всем осям локализованы в зонах передних контактных поверхностей деформирующих элементов профиля.

Наибольших сжимающих значений (до -1000 МПа) достигает осевой компонент (σ_x). Радиальный (σ_y) и окружной (σ_z) компоненты также характеризуются высокими (до $-970...-950$ МПа) значениями.

Анализ картины напряженно-деформированного состояния показал, что в наибольшей степени в процесс обработки вовлечены деформирующие элементы, работающие с наибольшими натягами (2-ой и 3-ий элементы).

Значительное влияние, в особенности с точки зрения создания наибольших сжимающих радиальных напряжений, оказывает также последний деформирующий элемент, который хотя и не работает с большим натягом, но в силу большего значения профильного радиуса поверхности оказывает значительное влияние на ПС детали в радиальном направлении.

Наибольшие осевые растягивающие напряжения величиной до 200 МПа наблюдаются в зонах вершин и задних контактных поверхностей 3-его и 4-го деформирующих элементов.

Следует отметить, что в зонах вершин и задних контактных поверхностей 1-ого и 2-го деформирующих элементов осевых растягивающих напряжений не наблюдается. По всей видимости, это вызвано воздействием 3-его и 4-ого деформирующих элементов на поверхностный слой детали.

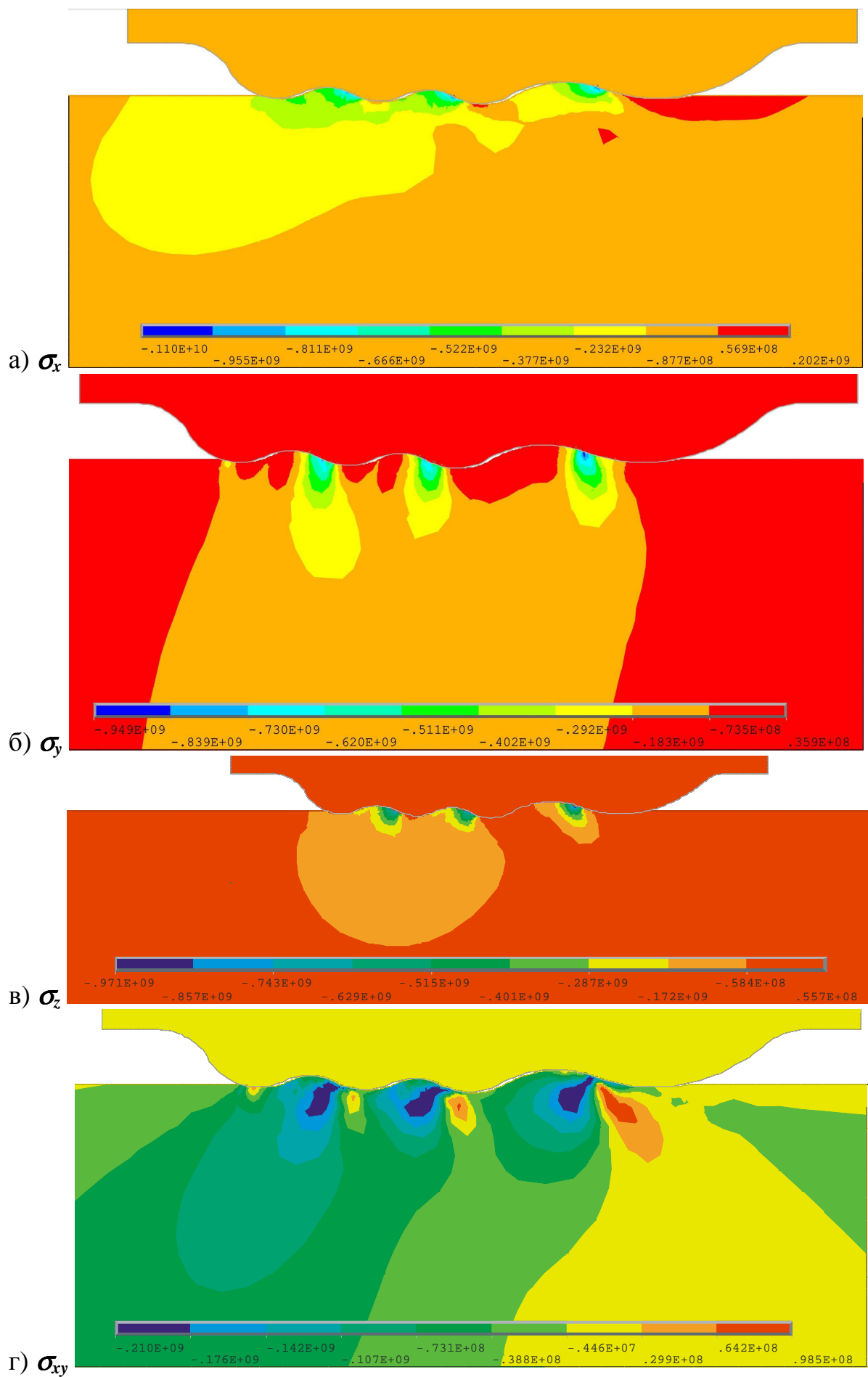


Рис. 1.9. Распределение компонент напряженного состояния (Па)

Растягивающие напряжения в радиальном (σ_r) и окружном (σ_θ) направлениях не обнаруживаются.

Касательный компонент σ_{xy} в целом характеризуется меньшими значениями напряжений, лежащими в диапазоне $-210...100$ МПа.

Картина распределения касательных напряжений по мере продвижения вдоль очага деформации представлена несколькими противоположными по знаку зонами. Множество таких зон обусловлено наличием нескольких деформирующих элементов и свидетельствует о возможности деформационного наноструктурирования металла поверхностного слоя в процессе обработки.

Наибольший перепад всех компонент напряжений наблюдается в зонах при вершинах деформирующих элементов. Здесь высокие значения сжимающих напряжений в районе передних контактных поверхностей деформирующих элементов переходят в околонулевые (рис. 1.9, б) или растягивающие (рис. 1.9, а, в) напряжения в районе задних контактных поверхностей деформирующих элементов.

Относительная деформация в основном локализована в области передних поверхностей деформирующих элементов (рис. 1.10, 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. 1.10, в).

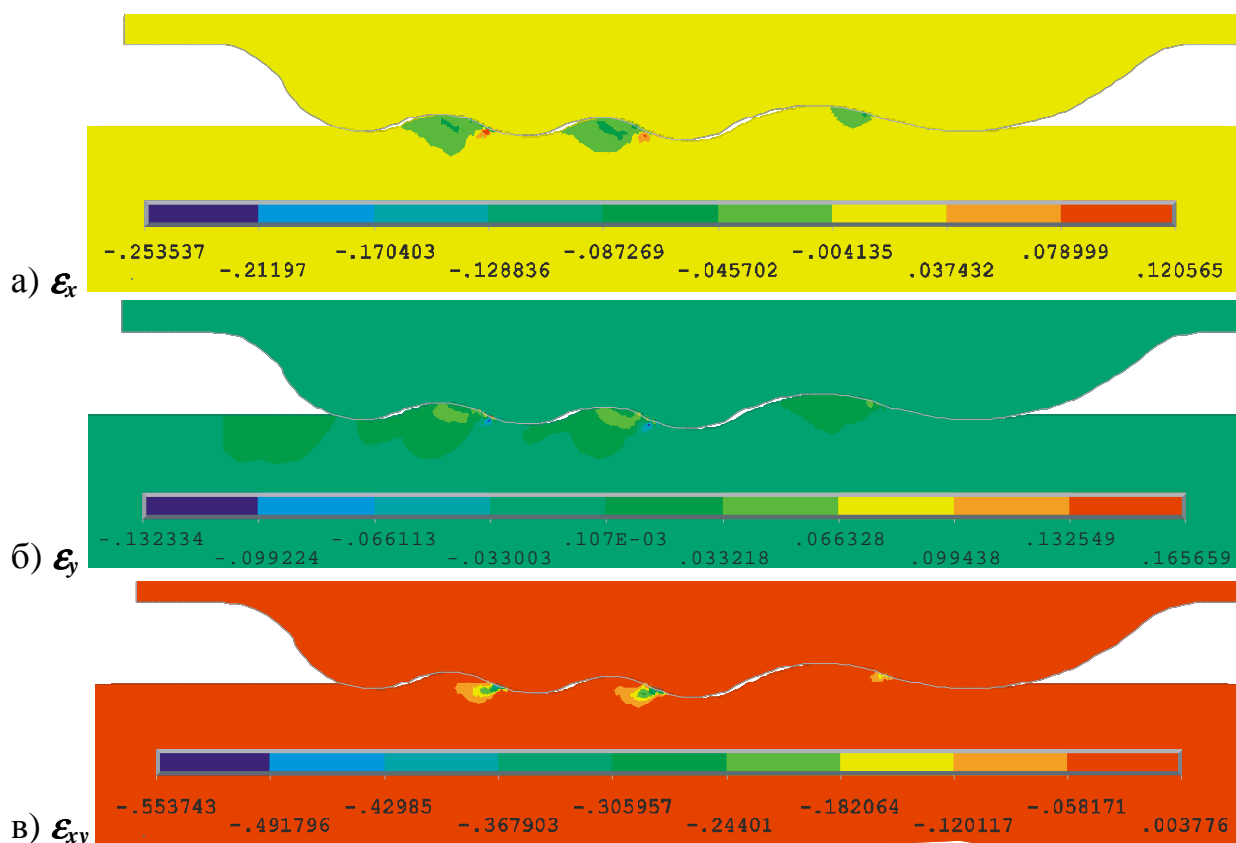


Рис. 1.10. Распределение компонент относительных деформаций

Картина напряженно-деформированного состояния для ролика **со 2-ым типом специального профиля** представлена на рис. 1.11 - 1.12.

Установлено, что наибольшие сжимающие напряжения (рис. 1.11, а-г) по всем осям локализованы в зоне передней контактной поверхности радиусного элемента профиля и в зоне его перехода в цилиндрическую часть.

Наибольших сжимающих значений (до -920 МПа) достигает осевой компонент (σ_x). Радиальный (σ_y) и окружной (σ_z) компоненты также характеризуются высокими (до -880 МПа) значениями.

По всей поверхности контакта с цилиндрическим элементом, по мере приближения к передней контактной поверхности радиусного элемента, наблюдается активный рост сжимающих напряжений нормальных компонент (σ_x , σ_y , σ_z), который прекращается в точке ее перехода в поверхность контакта с радиусной частью (рис. 1.11, а). Какого-либо изменения касательной составляющей σ_{xy} вдоль указанной траектории не происходит (рис. 1.11, б).

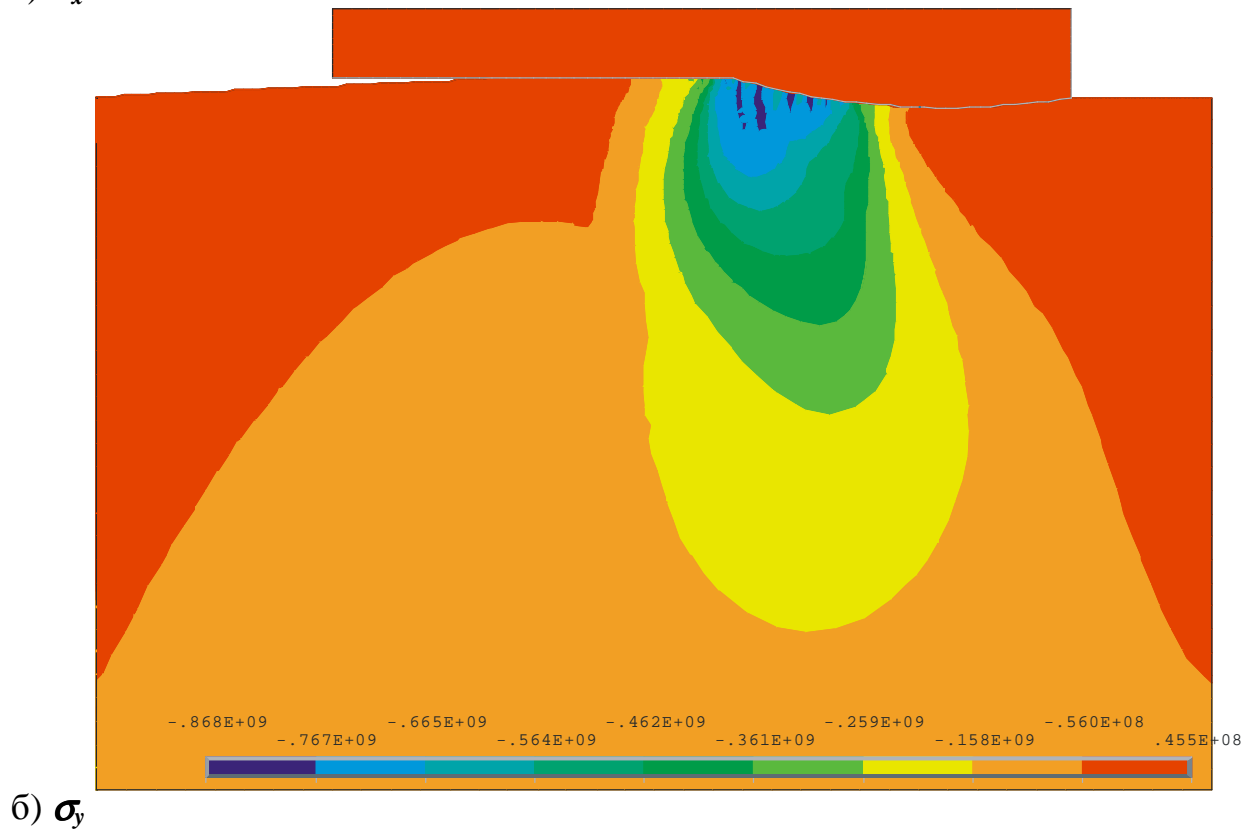
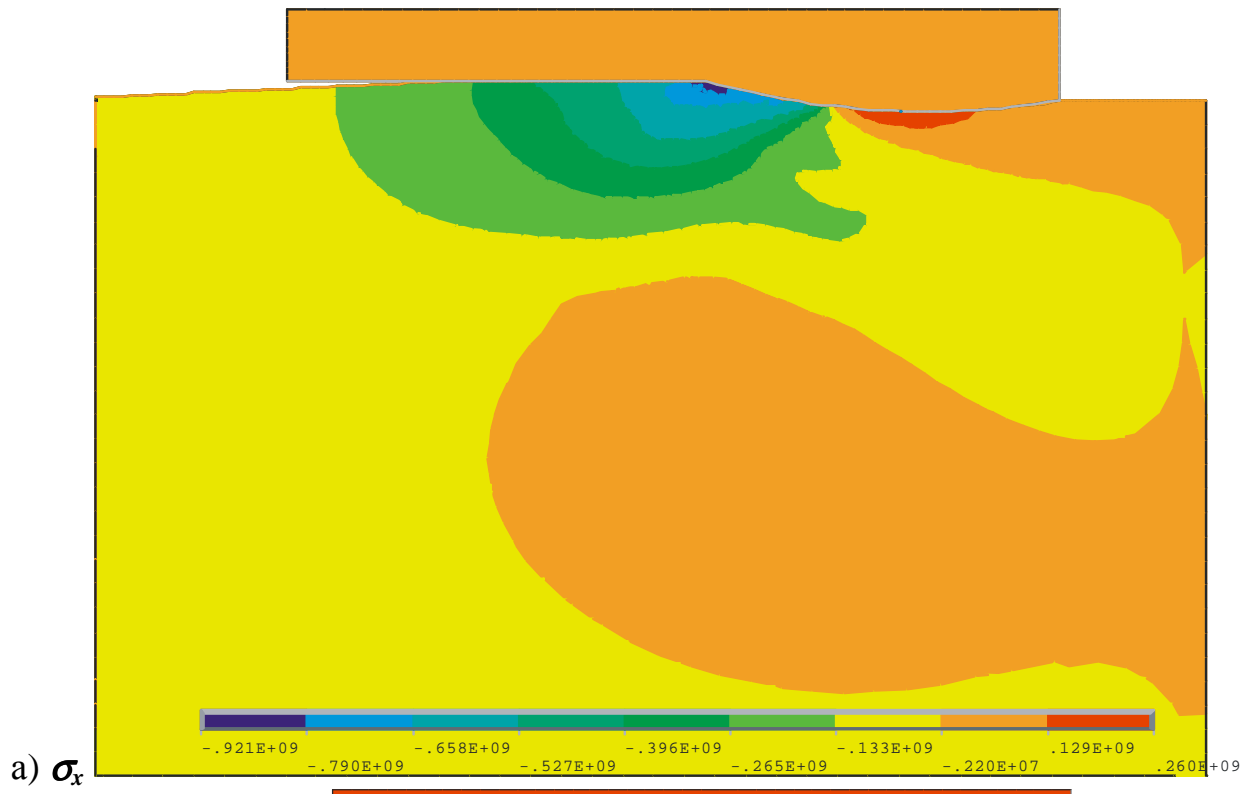
Наибольшие осевые растягивающие напряжения величиной до **260 МПа** наблюдаются в зоне вершины и задней контактной поверхности радиусного деформирующего элемента.

Значительных (более **50 МПа**) растягивающих напряжений в радиальном (σ_y) и окружном (σ_z) направлениях не обнаружено.

Касательный компонент σ_{xy} в целом характеризуется меньшими значениями напряжений, лежащими в диапазоне **-210...130 МПа**.

Картина распределения касательных напряжений по мере продвижения вдоль очага деформации представлена двумя противоположными по знаку зонами, находящимися соответственно в районе передней контактной поверхности и в районе вершины радиусного элемента профиля.

Наибольший перепад всех компонент напряжений наблюдается в зоне передней контактной поверхности у вершины деформирующего элемента. Здесь высокие значения сжимающих напряжений в районе передней контактной поверхности переходят в околонулевые (рис. 1.11, б) или растягивающие (рис. 1.11, а, в) напряжения в районе задних контактных поверхностей деформирующих элементов.



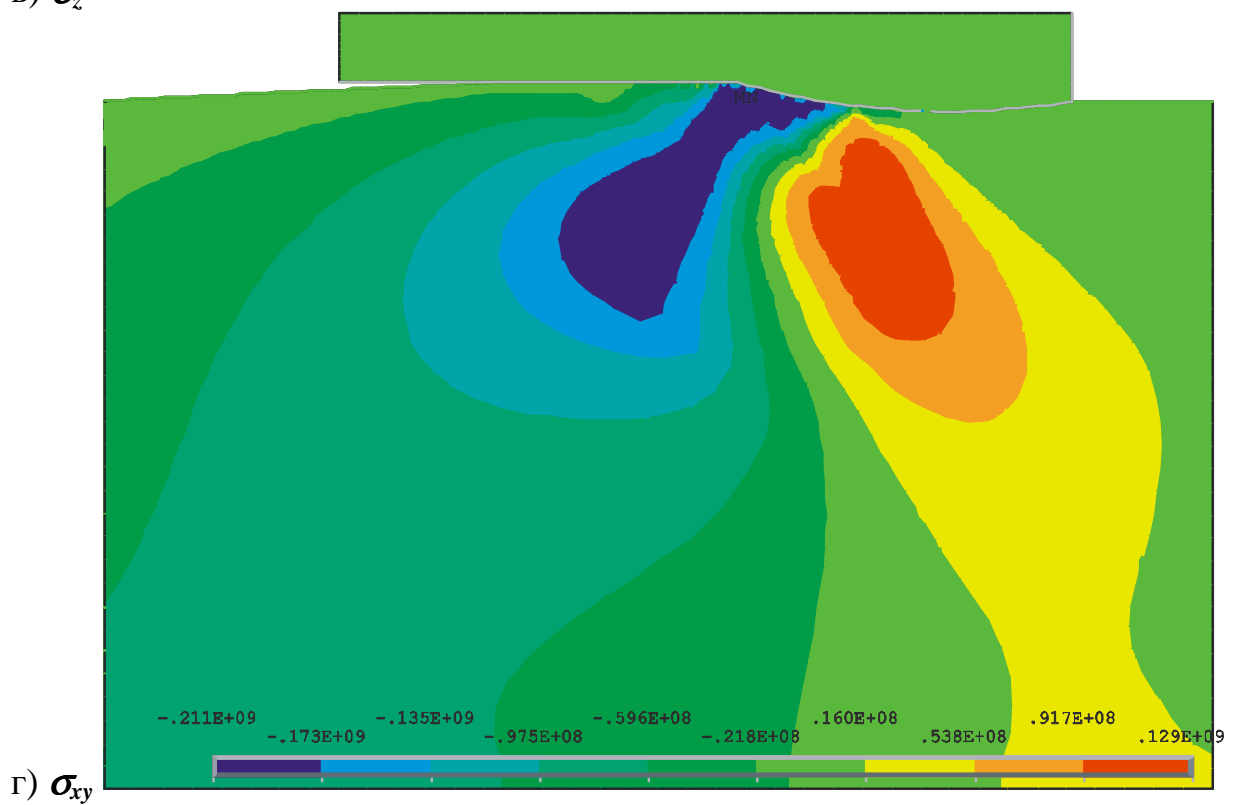
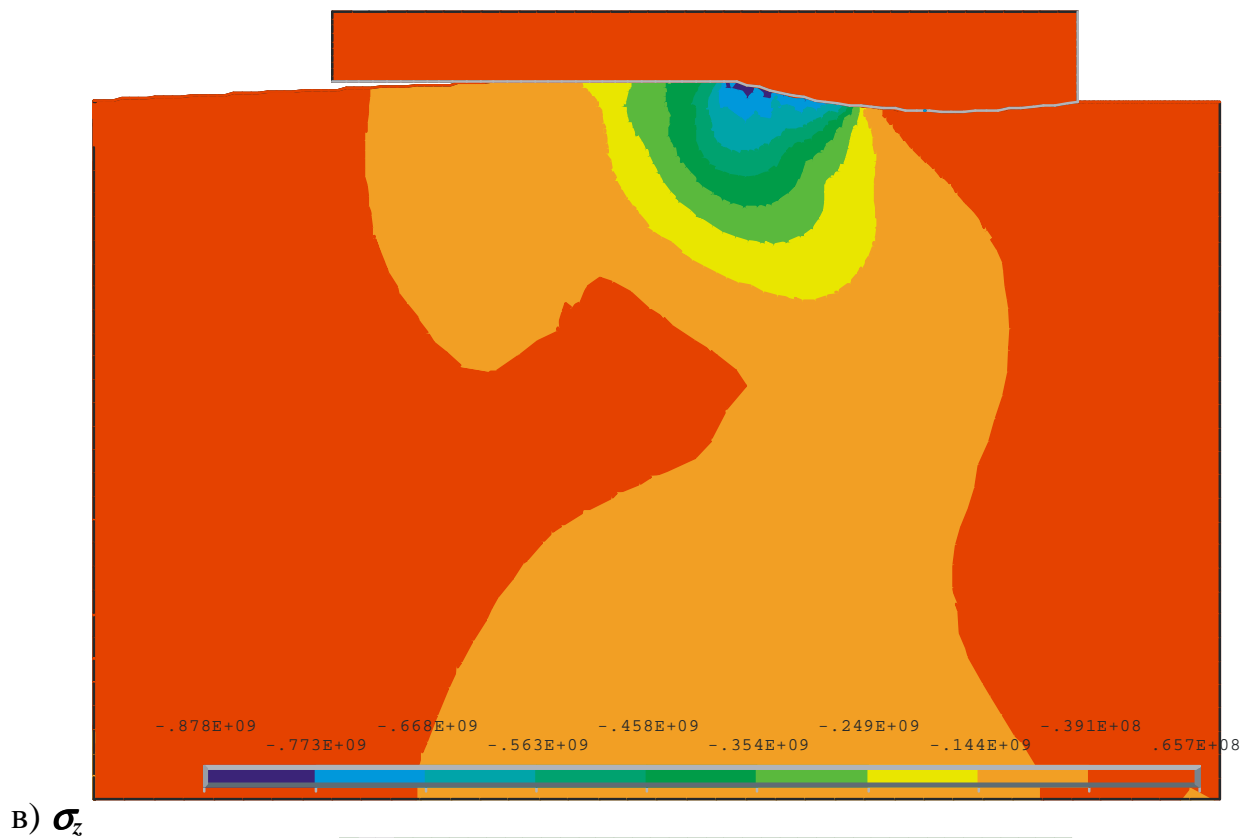


Рис. 1.11. Распределение компонент напряженного состояния (*Па*)

Относительная деформация в основном локализована в области контакта с цилиндрической частью инструмента и в области передней контактной поверхности радиусной части инструмента (рис. 1.12, 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. 1.12, в).

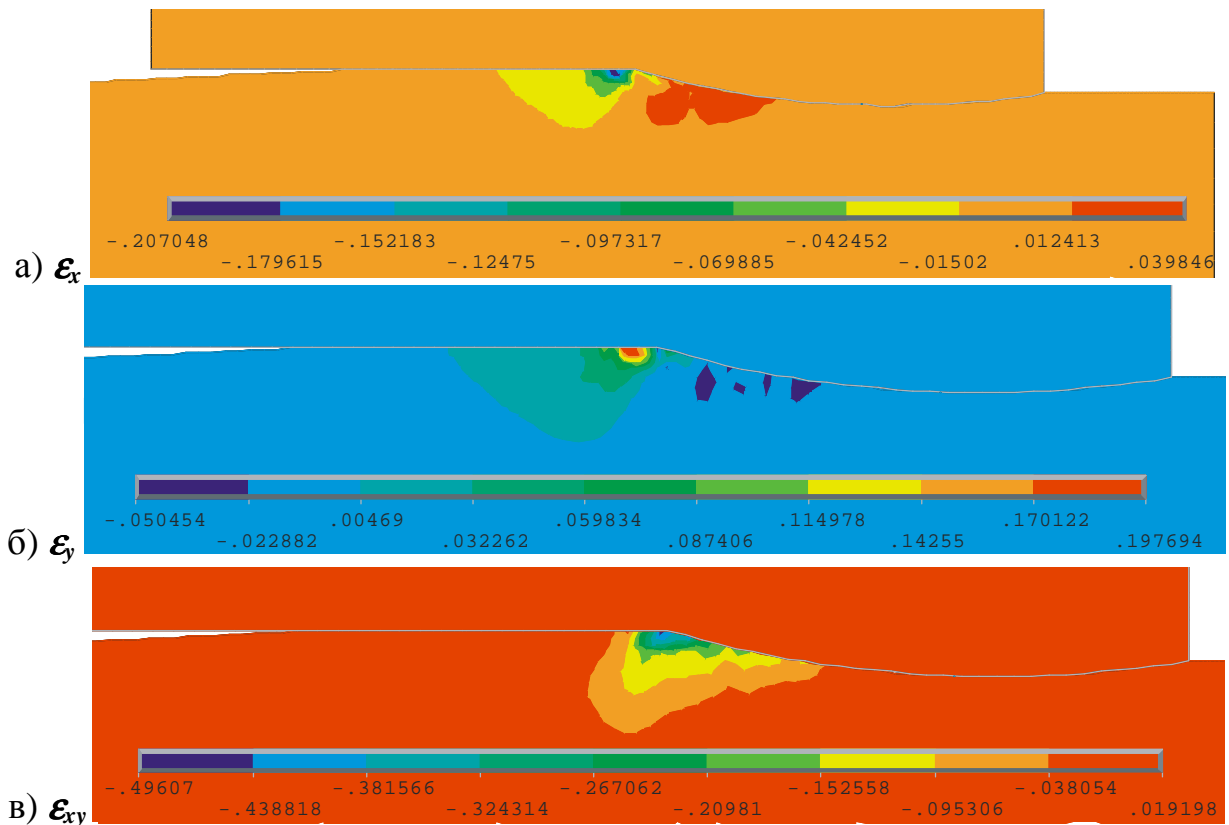


Рис. 1.12. Распределение компонент относительных деформаций

Возрастая вдоль поверхности контакта с цилиндрической частью ролика, наибольшие значения всех компонент деформаций наблюдаются в той зоне контакта с цилиндрической частью, которая непосредственно граничит с зоной перехода в переднюю контактную поверхность радиусной части ролика. Значения относительных деформаций в этой области составляют: $\epsilon_x = -0,2$, $\epsilon_y = 0,2$ и $\epsilon_{xy} = -0,5$. Далее, при продвижении к вершине радиусной части ролика значения деформаций снижаются, при этом, на передней контактной поверхности радиусной части ролика имеется еще одна область, характеризуемая значениями: $\epsilon_x = 0,04$, $\epsilon_y = -0,05$, $\epsilon_{xy} = -0,15$.

Картина напряженно-деформированного состояния для ролика **с 3-им типом специального профиля** представлена на рис. 1.13 - 1.14.

Установлено, что наибольшие сжимающие напряжения (рис. 1.13, а-г) по всем осям локализованы в зоне передних контактных поверхностей деформирующих элементов.

Наибольших сжимающих значений (до -800 МПа) достигает радиальный компонент (σ_y). Осевой (σ_x) и окружной (σ_z) компоненты характеризуются несколько меньшими значениями - до -720 МПа и -660 МПа соответственно.

Анализ картины напряженного состояния показал наличие существенного взаимного влияния деформирующих элементов друг на друга: поля напряжений деформирующих элементов пересекаются, образуя объединенный очаг деформации. При этом, в зоне задней контактной поверхности 1-го деформирующего элемента осевые (σ_x) и окружные (σ_z) растягивающие напряжения, свойственные этой зоне, вообще не успевают возникнуть вследствие влияния 2-го близкорасположенного деформирующего элемента.

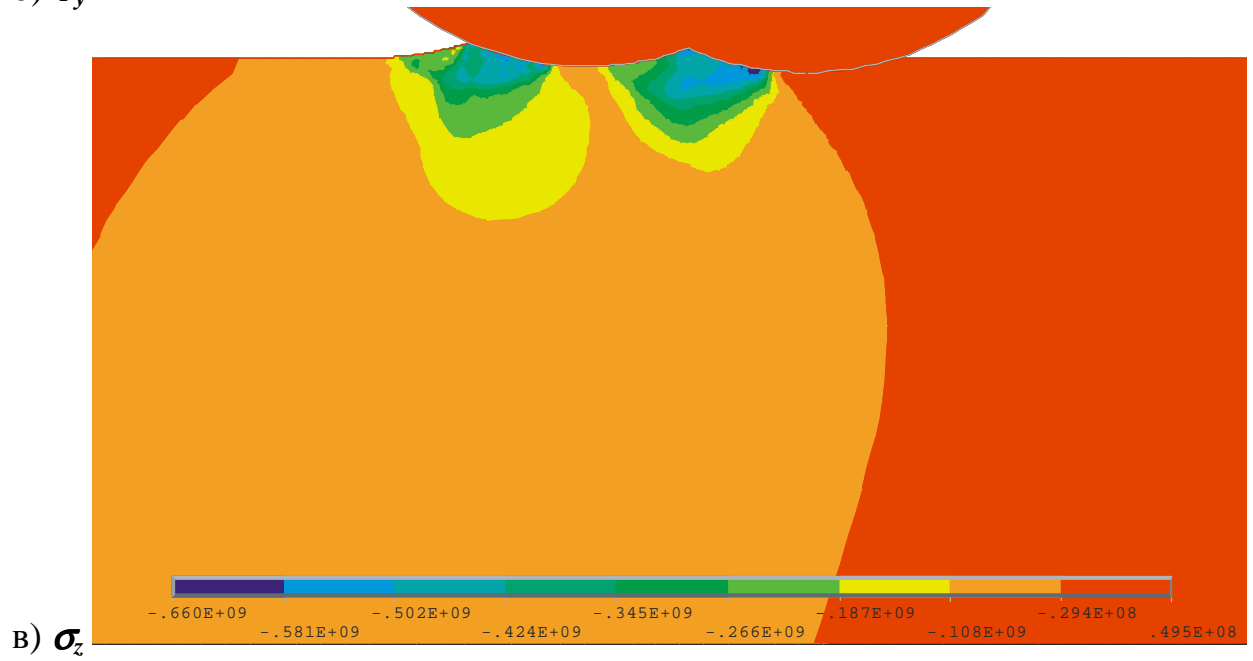
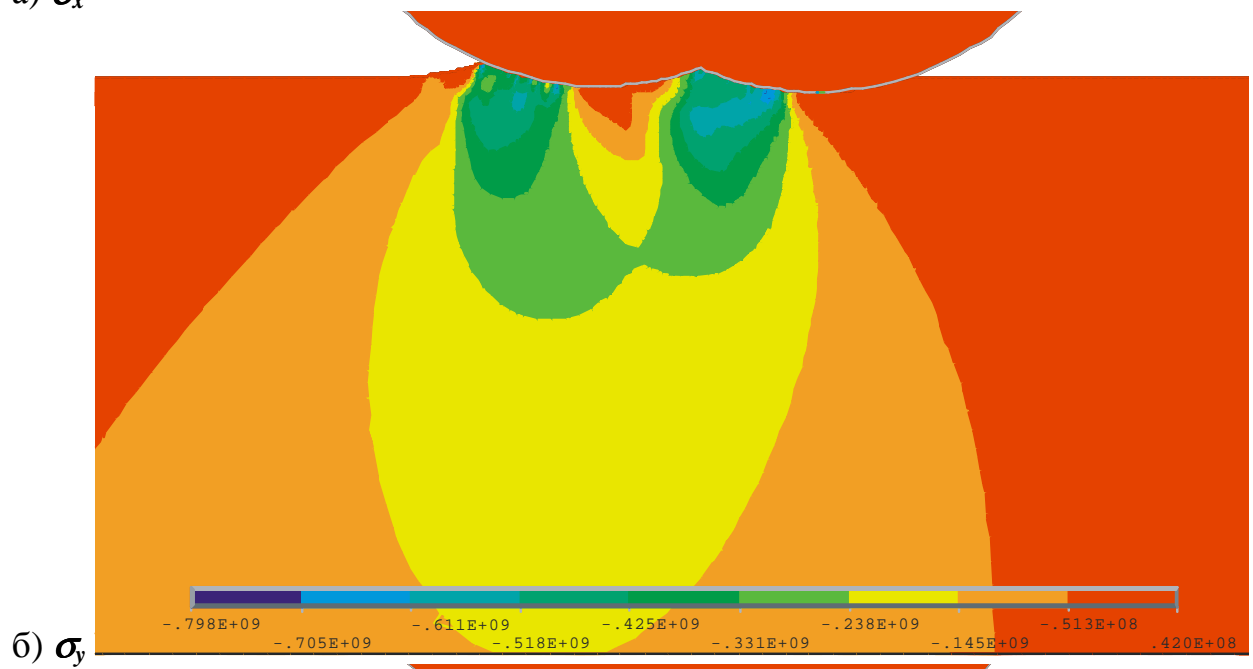
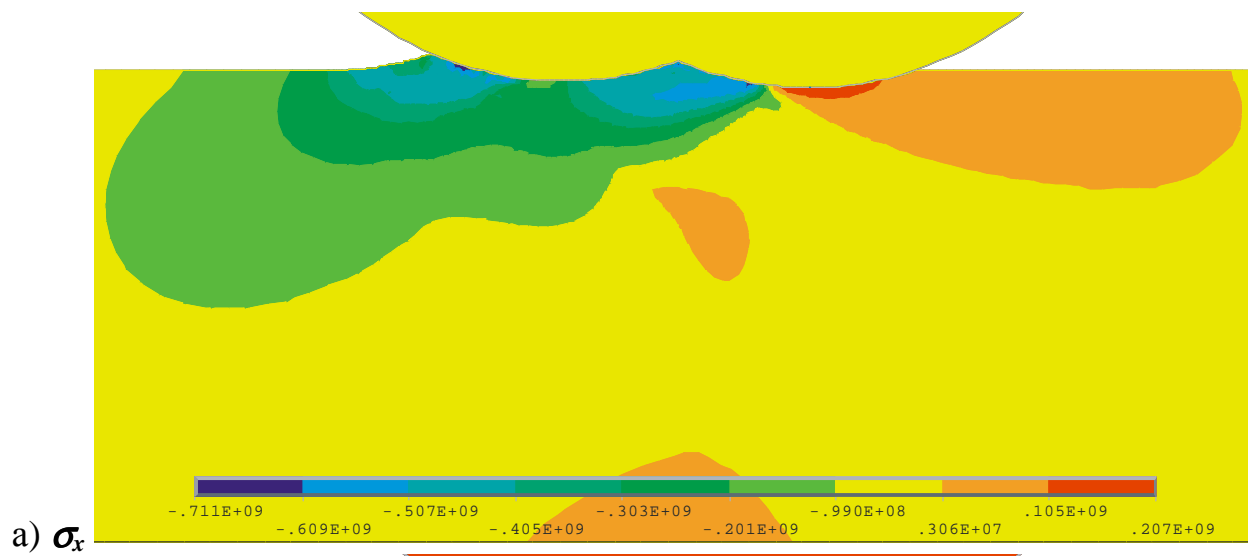
Наибольшие растягивающие напряжения величиной до 210 МПа возникают в осевом направлении в зоне задней контактной и внеконтактной поверхностей 2-го деформирующего элемента. Значительных, более 50 МПа, растягивающих напряжений в других направлениях не наблюдается.

Касательный компонент σ_{xy} в целом традиционно характеризуется меньшими значениями напряжений, лежащими в диапазоне $-210...150$ МПа.

Картина распределения касательных напряжений по мере продвижения вдоль очага деформации представлена несколькими зонами.

1-я зона – значительные отрицательные напряжения в районе передней контактной поверхности 1-го деформирующего элемента.

2-я зона – район задней контактной поверхности 1-го деформирующего элемента представлена весьма небольшой по размерам и величине областью положительных напряжений.



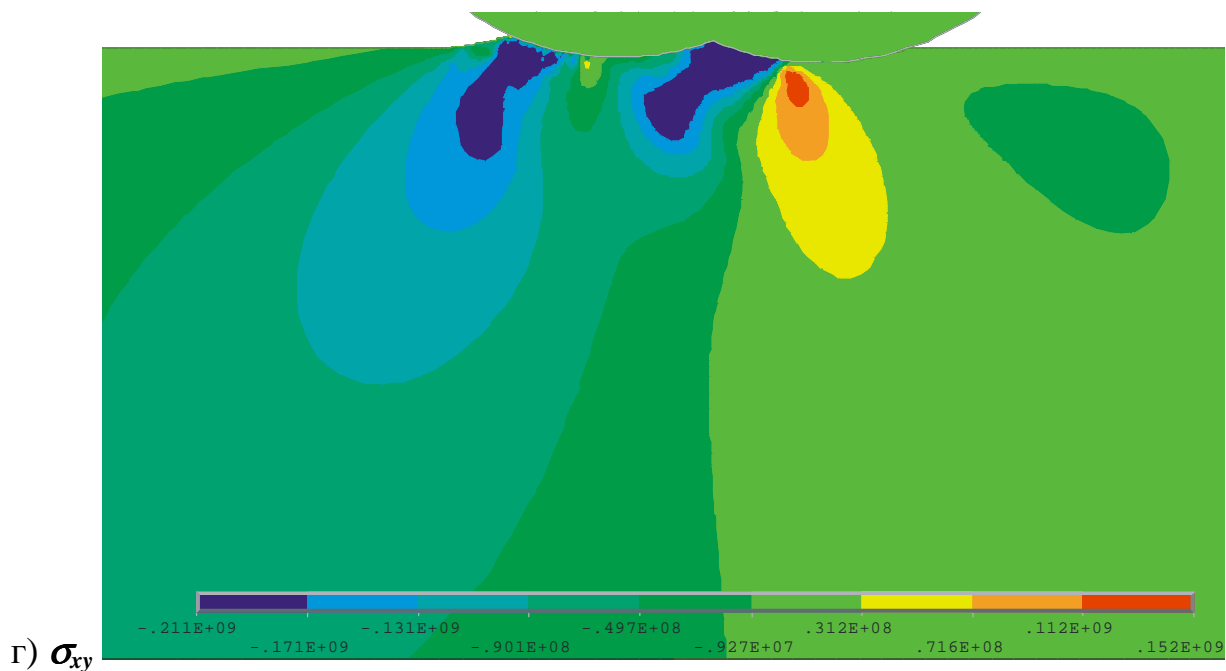


Рис. 1.13. Распределение компонент напряженного состояния (Πa)

Малые размеры 2-ой зона обусловлены действием значительных отрицательных напряжений близко расположенной 3-ей зоны в районе передней контактной поверхности 2-го деформирующего элемента.

4-ая зона, характеризуемая значительными положительными напряжениями, расположена в районе вершины и задней контактной поверхности 2-го деформирующего элемента.

Наибольший перепад всех компонент напряжений наблюдается в зонах при вершинах деформирующих элементов. Здесь высокие значения сжимающих напряжений в районе передних контактных поверхностей переходят в околонулевые или растягивающие напряжения в районе задних контактных поверхностей.

Относительная деформация в основном локализована в области передних контактных и внеконтактных поверхностей деформирующих элементов (рис. 1.14, 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. 1.14, в).

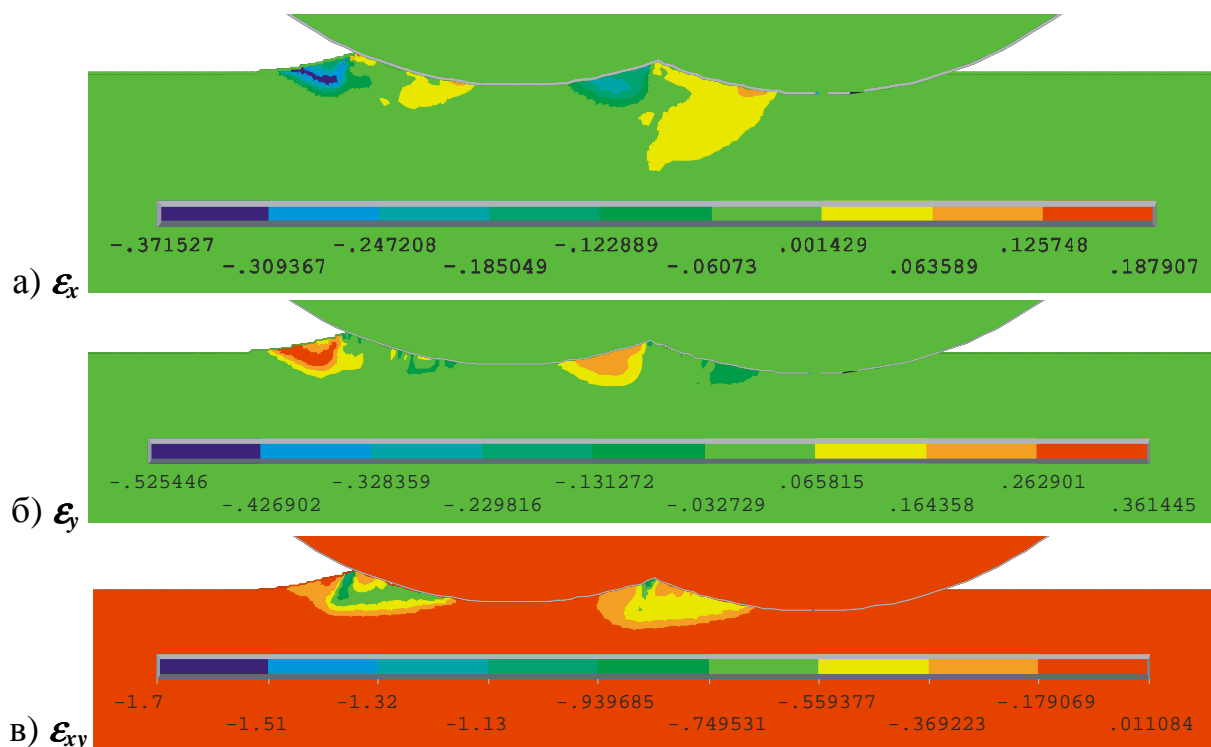


Рис. 1.14. Распределение компонент относительных деформаций

1.1.2. Описание закономерностей технологического наследования и механических свойств поверхностного слоя при упрочняющей обработке поверхностного слоя роликами специальных профилей

Ниже представлены распределения компонент тензора напряженно-деформированного состояния, возникающего в ОД вдоль ЛТ, формирующей поверхность детали при упрочняющей обработке роликом специального профиля 1-го типа (рис. 1.15 - 1.21). Методика получения распределений характеристик вдоль линий тока описана в подразделе 1.1.1.

В точке входа в очаг деформации (в точке зарождения пластической волны) компоненты напряженно-деформированного состояния уже имеют ненулевые значения (рис. 1.15). Это свидетельствует о том, что зона напряженного состояния имеет большие размеры, чем зона пластического течения металла.

Видно, что наибольшие сжимающие напряжения (до -500 МПа) по всем направлениям наблюдаются в зоне первого деформирующего элемента. По мере продвижения по очагу деформации указанные напряжения этапно

(волнообразно) снижаются, переходя в небольшие по величине растягивающие напряжения в районе четвертого деформирующего элемента (до **60 МПа**). Наибольшими сжимающими напряжениями характеризуется радиальный компонент σ_r .

Волнообразный характер изменения напряжений в ОД обусловлен многократностью приложения деформирующего усилия: число волн в картине напряженного состояния соответствует числу деформирующих элементов ролика.

По мере продвижения вдоль деформирующих элементов наблюдаются значительные (до **400 МПа**) перепады компонент напряжений, происходящие на сравнительно коротких участках длиной **0,5..1 мм**.

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

Изменение интенсивности касательных напряжений T и среднего нормального напряжения σ также носит волнообразный характер.

Интенсивность касательных напряжений T достигает максимальной величины **200 МПа** в зоне между 1-ым и 2-ым, а также в зоне между 2-ым и 3-им деформирующими элементами. Имеется еще один локальный экстремум, характеризуемый несколько меньшими (**150 МПа**) значениями (рис. 1.16). Затем T постепенно уменьшается к точке выхода из очага деформации. Перепады значений интенсивности касательных напряжений наблюдаются в зонах передних и задних контактных поверхностей деформирующих элементов.

Среднее нормальное напряжение σ на всем протяжении, вплоть до выхода из ОД имеет отрицательные значения.

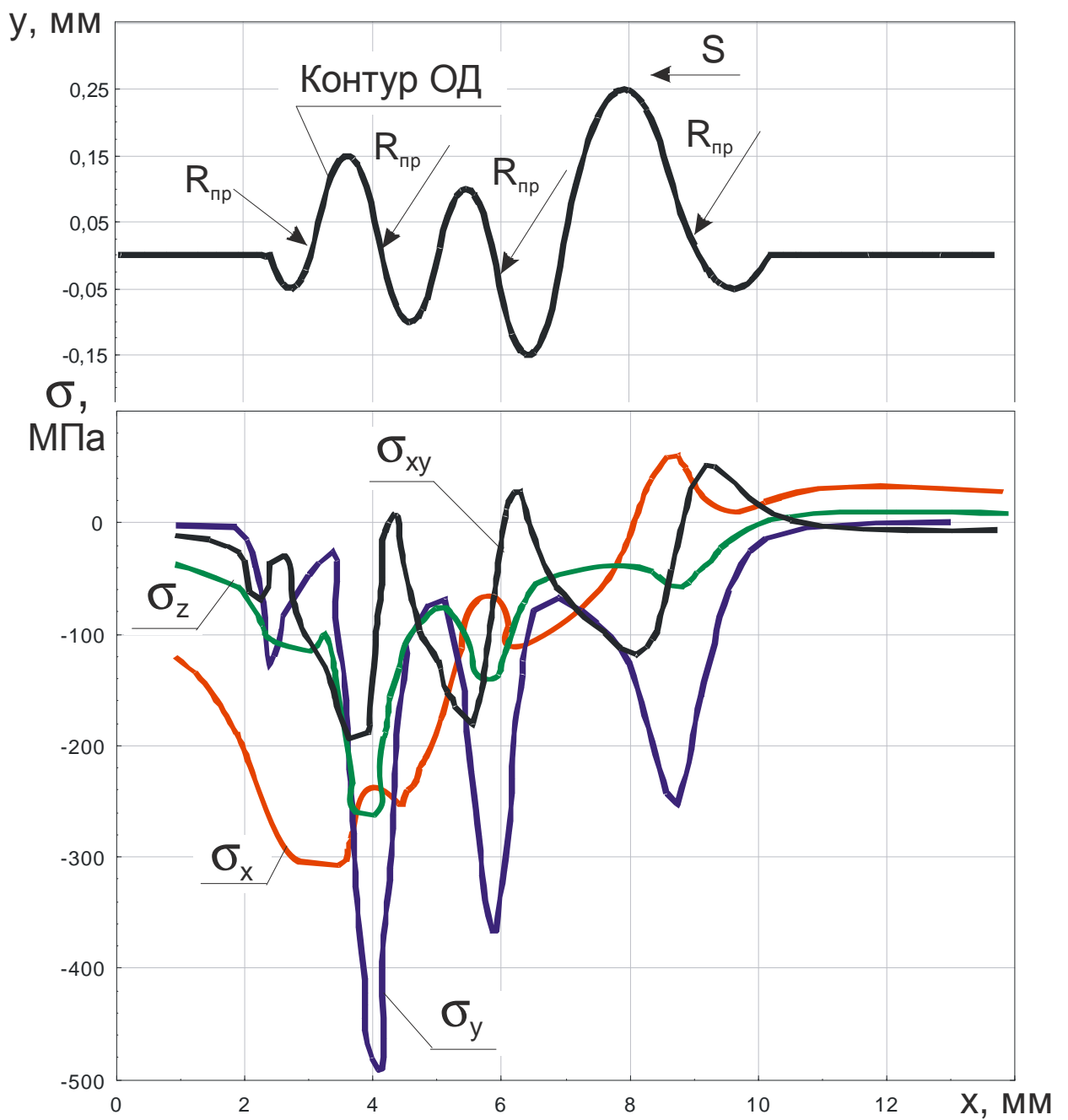


Рис. 1.15. Распределение компонент тензора напряжений $[T\sigma]$

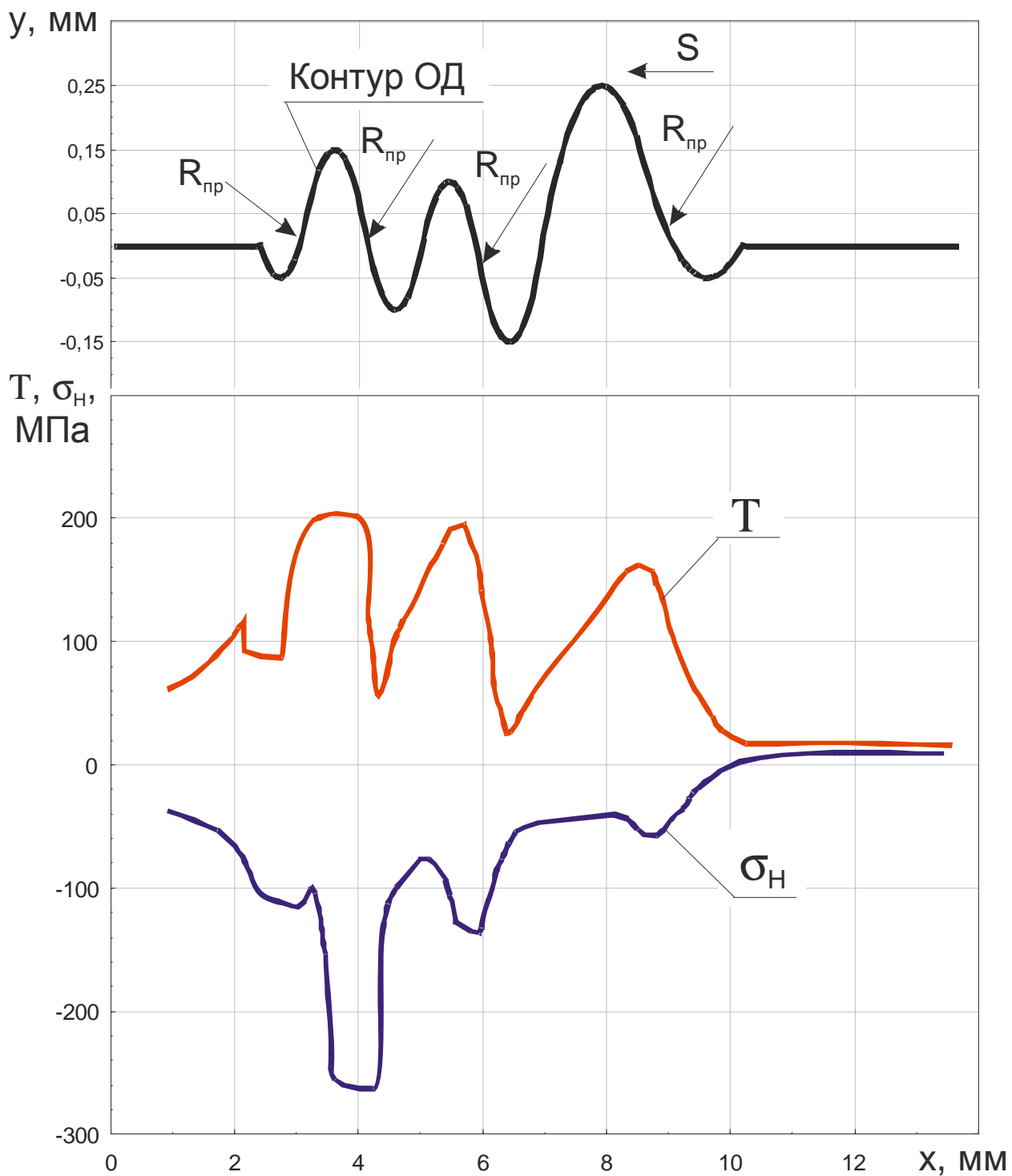


Рис. 1.16. Распределение интенсивности касательных напряжений T и среднего нормального напряжения σ

На контуре передней контактной поверхности 2-ого деформирующего элемента σ принимает наибольшее по абсолютной величине отрицательное значение **-260 МПа**. Имеется еще два локальных экстремума с меньшими средними значениями напряжений. Характер распределения средних

нормальных напряжений говорит о том, что большая часть металла очага деформации находится в условиях сжатия.

Весьма сложной является картина распределения скоростей деформации (рис. 1.17). Имеются множественные, различные по величине перепады всех компонент, сопровождаемые переходами между положительной и отрицательной областями.

Все компоненты скоростей деформаций на протяжении ОД изменяются практически синхронно. При этом, наибольшими значениями ($\xi_{xy} = 0,3 \text{ с}^{-1}$), расположенными опять же в районе передней контактной поверхности 2-го деформирующего элемента, характеризуется касательный компонент.

Осевой ξ_x и радиальный ξ_y компоненты имеют несколько меньшие значения, лежащие в диапазоне $-0,01...0,01 \text{ с}^{-1}$.

Различные по величине локальные экстремумы мгновенных значений компонент скоростей деформации наблюдаются в районе передних контактных поверхностях всех деформирующих элементов.

В зоне выхода из од все компоненты принимают близкие к нулю значения.

Анализ показал, что при обработке специальным роликом с профилем 1-ого типа в очаге деформации можно выделить 8 участков квазимонотонной деформации. На границах этих зон нарушается монотонность деформации, т.е. изменяется ее знак, что приводит к частичному восстановлению запаса пластичности металла (рис. 1.18).

Стартовое значение показателя схемы напряженного состояния составляет $\Pi = -0,577$, что соответствует началу накопления металлом деформации. Почти на протяжении всего очага деформации показатель схемы напряженного состояния отрицателен, достигая максимальных значений $\Pi = -2,5$ в районе вершин 2-го и 3-его деформирующих элементов. Положительные значения $\Pi = 0,577$ наблюдаются лишь только в зоне выхода из очага деформации.

Показатель вида напряженного состояния (показатель Лоде) имеет характер распределения симметричный показателю схемы напряженного состояния.

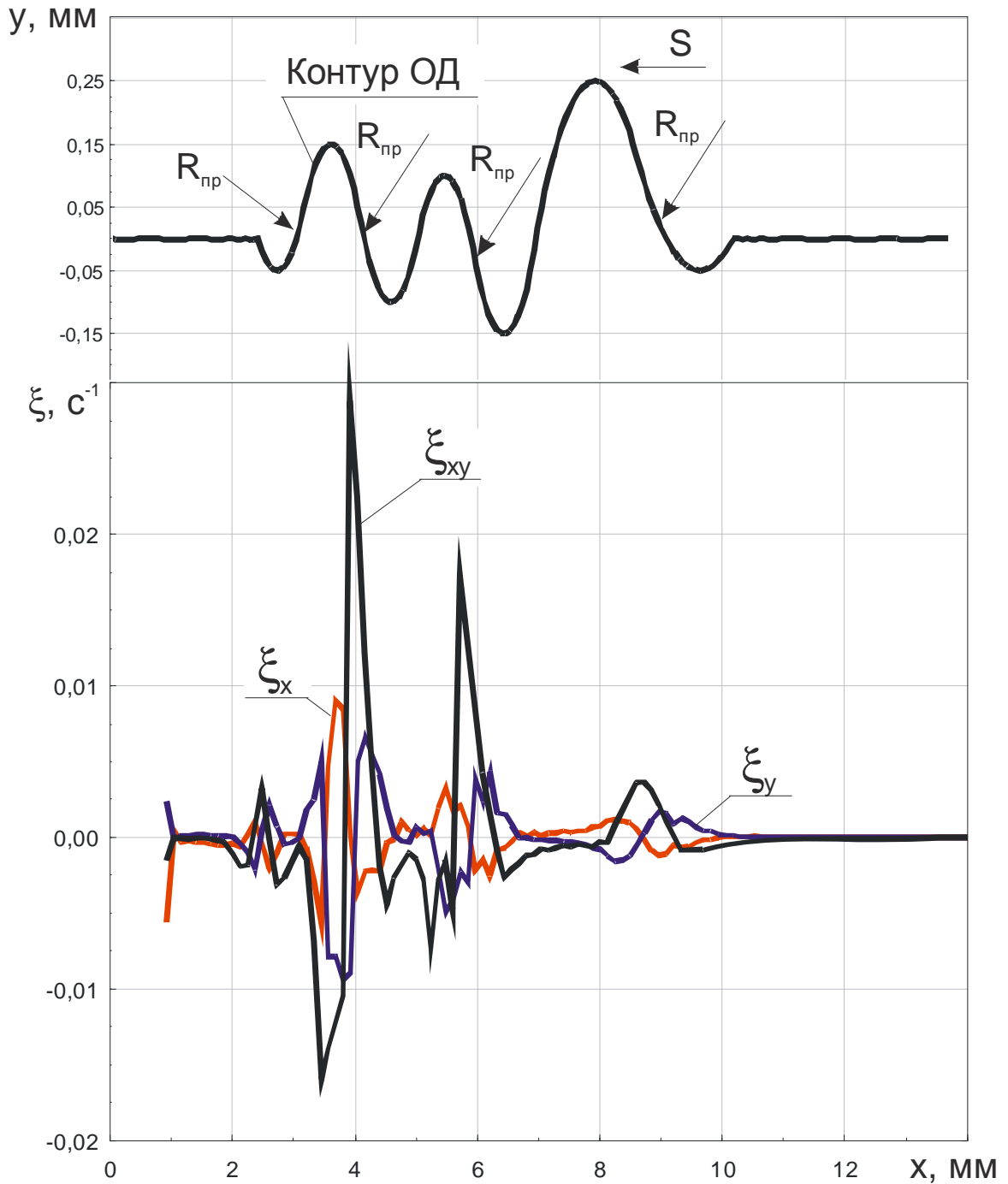


Рис. 1.17. Распределение компонент тензора скоростей деформации $[T \xi_{i,j}]$

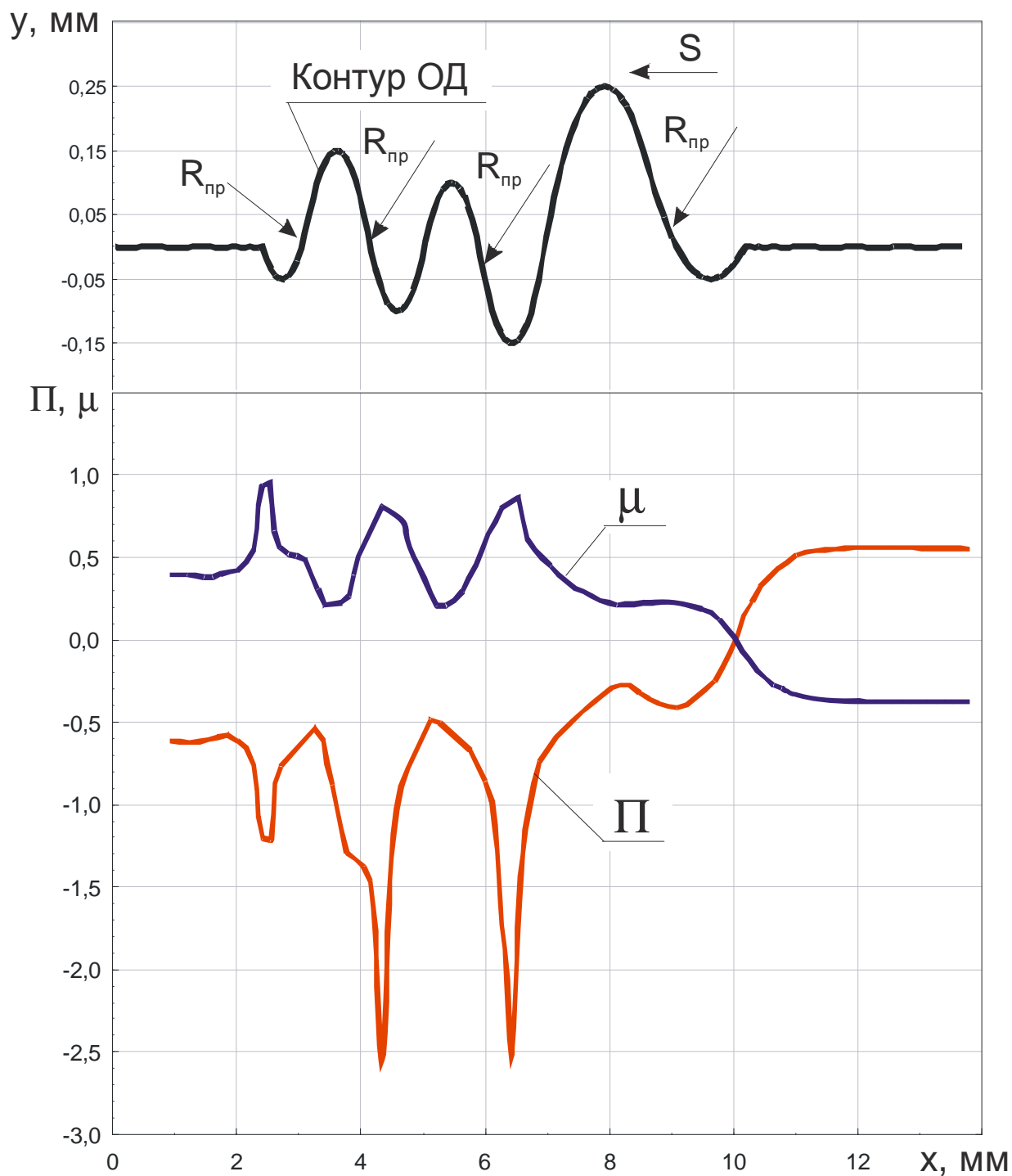


Рис. 1.18. Распределение показателя схемы напряженного состояния Π и параметра Лоде μ

Установлено, что наиболее интенсивный прирост степени деформации сдвига $\Delta\Lambda$ и степени истощения запаса пластичности $\Delta\Psi$ (СИЗП) происходит в зонах передних контактных поверхностей деформирующих элементов (рис. 1.19).

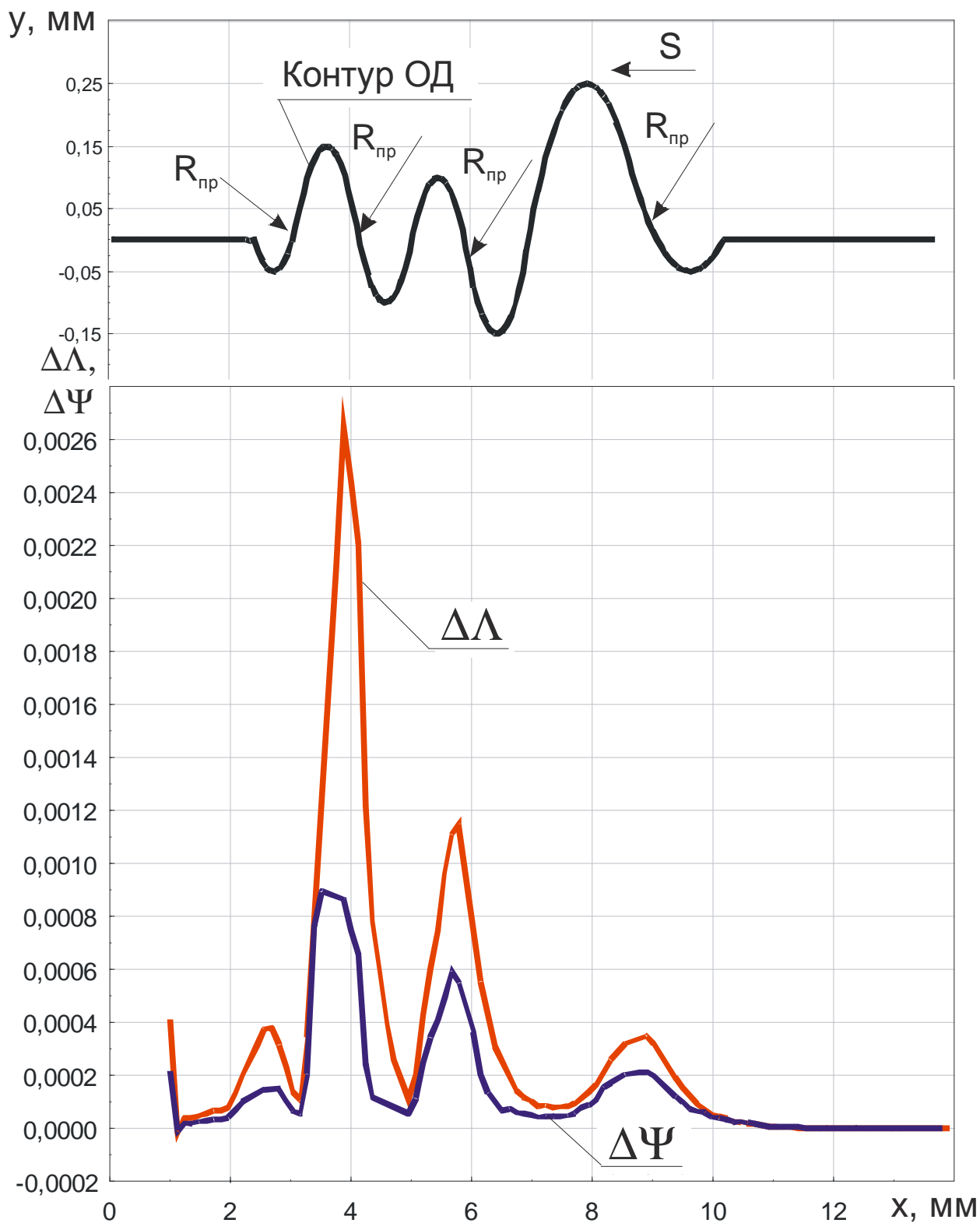


Рис. 1.19. Распределение мгновенных значений степени деформации сдвига $\Delta\Lambda$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Delta\Psi$

Предварительный анализ показал, что при обработке роликом специального профиля 1-го типа накопление деформации и исчерпание

запаса пластичности происходит волнообразно, однако при этом накапливаются феноменально малые значения степени деформации сдвига $\Lambda = 0,046$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,02$ (рис. 1.20).

Так, например, при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием традиционными роликами с профильным радиусом $R_{rp} = 1,6...10$ мм, значения степени деформации сдвига лежат в диапазон $\Lambda = 0,2...1$, а значения степени исчерпания запаса пластичности находятся в диапазоне $\Psi = 0,1...0,9$.

Еще одной особенностью обработки роликом с профилем 1-го типа является соотношение Λ/Ψ , составляющее 2,3, в то время как при обработке деталей ППД традиционными роликами это соотношение не превышает $\Lambda/\Psi = 1,5$.

Известно, что еще большее соотношение степени деформации сдвига к степени исчерпания запаса пластичности $\Lambda/\Psi = 4,6$ наблюдается при обработке способом размерного совмещенного обкатывания, который является оригинальной разновидностью совмещенной обработки резанием и традиционным ППД роликом [1].

Установлено, что при обработке роликом специального профиля 1-го типа имеется больший, чем при обычных схемах ППД, диапазон управления программой нагружения, а сама программа нагружения имеет весьма оригинальную траекторию, обнаруживающую вертикальные участки (рис. 1.21). Наличие таких участков свидетельствует о возможности наноструктурирования металла поверхностного слоя при обработке роликом специального профиля 1-го типа.

Результаты моделирования также показали весьма равномерное накопление Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя (рис. 1.22). Градиенты степени деформации сдвига и СИЗП по глубине упрочненного слоя составили:

$$\Gamma(\Lambda) = \frac{\Lambda}{h} = \frac{0,034}{0,475} = 0,0715; \quad \Gamma(\Psi) = \frac{\Psi}{h} = \frac{0,014}{0,475} = 0,0295.$$

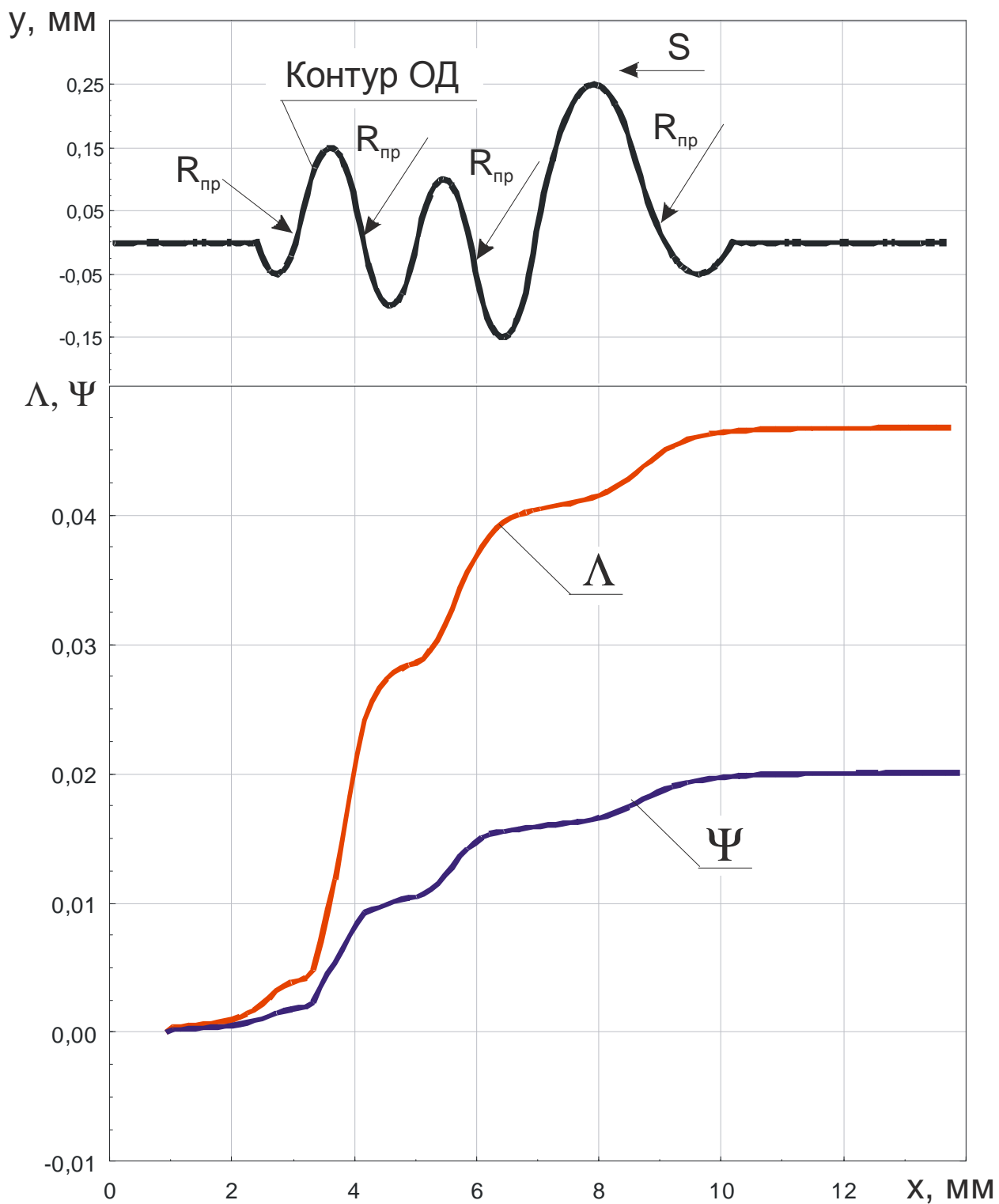


Рис. 1.20. Распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени исчерпания запаса пластичности Ψ ($\Psi = 1$ - полное исчерпание запаса пластичности)

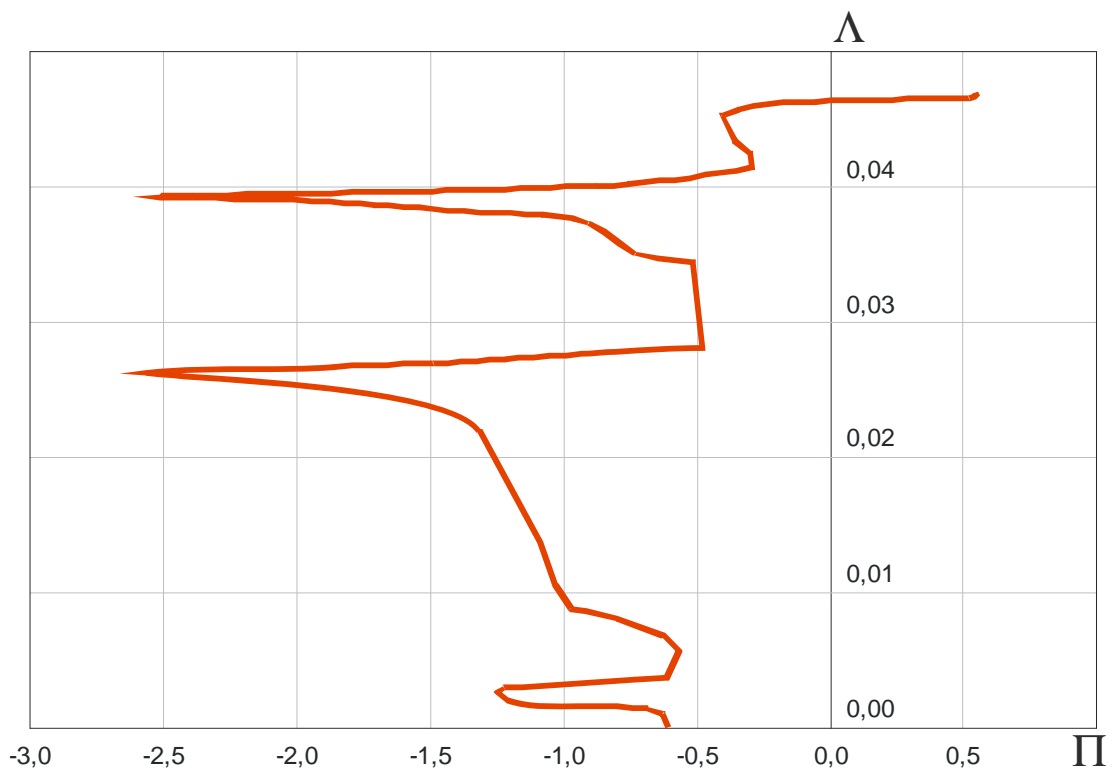


Рис. 1.21. Зависимость накопленной степени деформации Λ от показателя схемы напряженного состояния Π (программа нагружения)

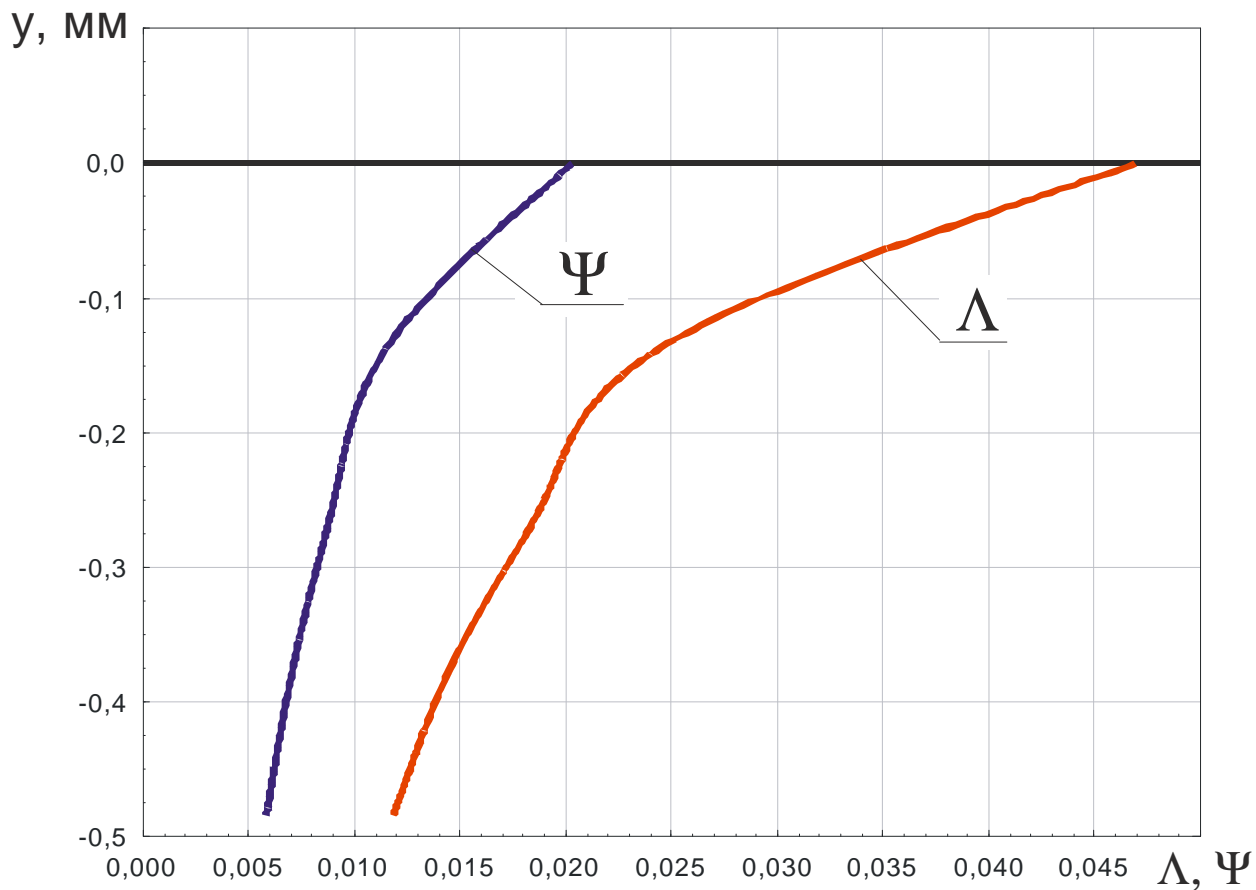


Рис. 1.22. Накопленные значения Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя

Ниже представлены распределения компонент тензора напряженно-деформированного состояния, возникающего в ОД вдоль ЛТ, формирующей поверхность детали при упрочняющей обработке роликом специального профиля 2-го типа (рис. 1.23 - 1.29).

В точке входа в очаг деформации (в точке зарождения пластической волны) компоненты напряженно-деформированного состояния имеют нулевые значения (рис. 1.23). Это свидетельствует о том, что зона напряженного состояния имеет большие размеры, чем зона пластического течения металла.

Сжимающие нормальные напряжения по всем направлениям нарастают фактически вдоль всей поверхности контакта с цилиндрической частью деформирующего ролика и достигают своих максимальных сжимающих значений **-700...-800 МПа** в зоне сопряжения цилиндрической и радиусной частей ролика. Далее, вдоль передней контактной поверхности с радиусной частью ролика имеется участок некоторой стабильности компонент напряженного состояния, заканчивающийся при приближении к вершине радиусной части ролика.

В районе вершины радиусной части ролика наблюдается наиболее резкий перепад напряжений, достигающий **800 МПа** на участке очага деформации длиной **0,5 мм**, и происходит разгрузка с некоторым переходом в область околонулевых напряжений в районе вершины радиусной части ролика. Осевой компонент σ_x при этом приобретает положительные значения (растягивающие напряжения).

Наибольшие растягивающие значения напряжений в этой зоне имеет осевой компонент $\sigma_x > 200 \text{ МПа}$.

Касательный компонент напряженного состояния σ_{xy} имеет аналогичный нормальным характер распределения, однако отличается меньшими значениями, экстремум составляет около $\sigma_{xy} = -200 \text{ МПа}$. Положительных значений касательного компонента не наблюдается.

Интенсивность касательных напряжений T достигает максимальной величины 200 МПа на поверхности контакта с цилиндрической частью деформирующего ролика (рис. 1.24). Вдоль поверхности контакта с радиусной частью ролика происходит постепенное уменьшение T до нулевых значений к точке выхода из очага деформации.

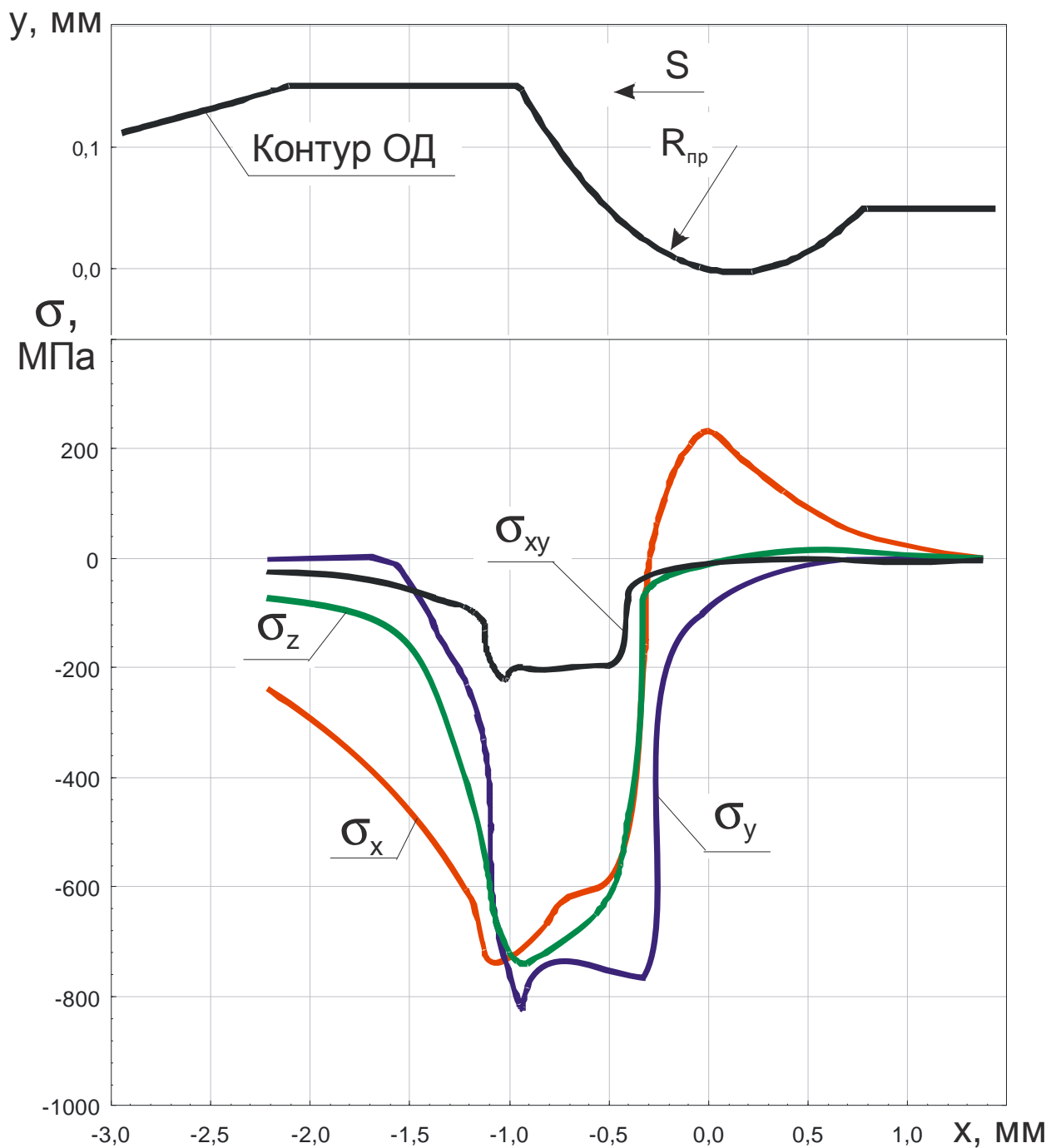


Рис. 1.23. Распределение компонент тензора напряжений $[T\sigma]$

Среднее нормальное напряжение σ на всем протяжении передней внеконтактной поверхности и поверхности контакта с цилиндрической частью ролика имеет отрицательные значения. Наибольшее по абсолютной величине отрицательное значение σ принимает в средней части поверхности контакта с цилиндрической частью ролика.

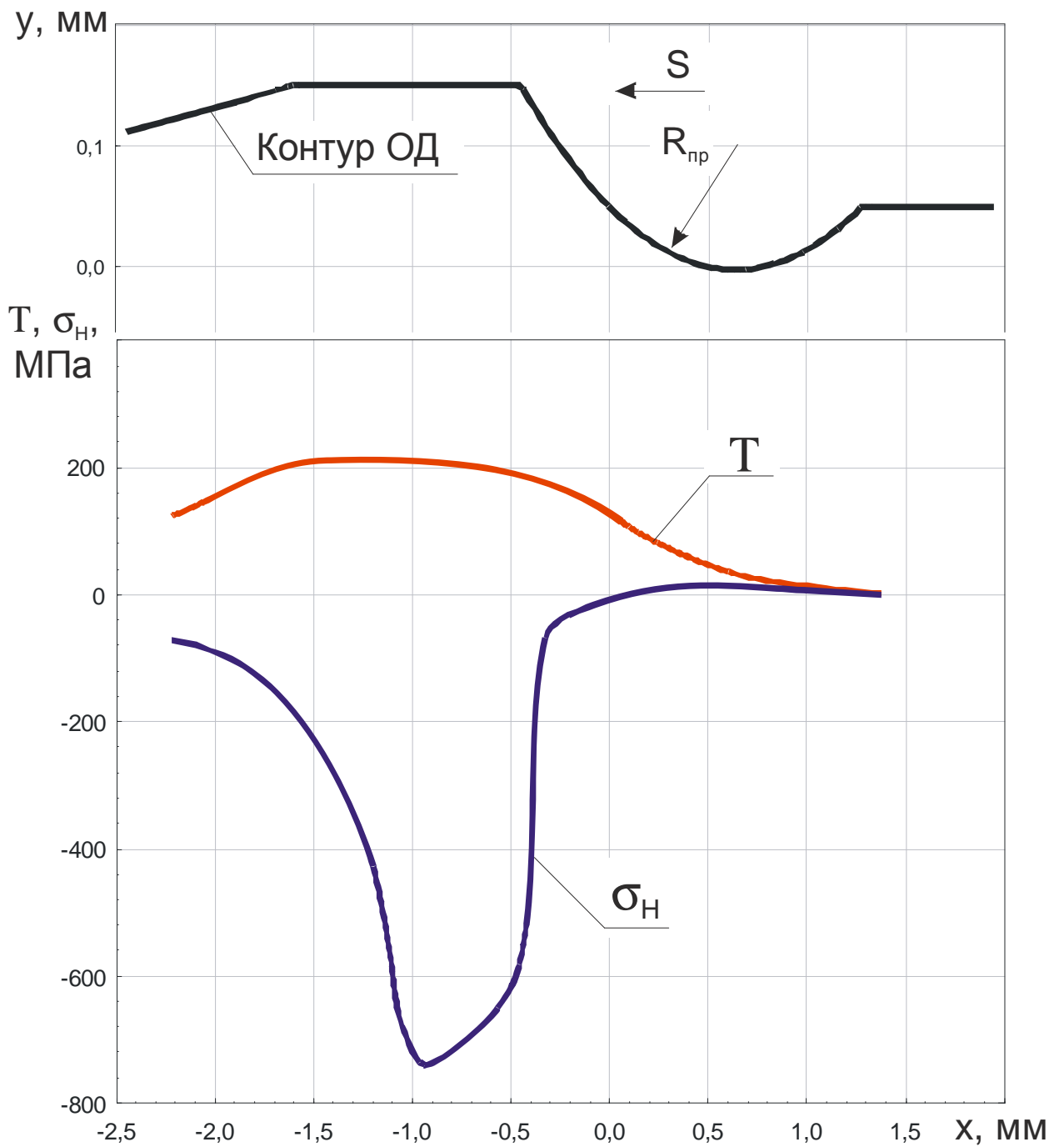


Рис. 1.24. Распределение интенсивности касательных напряжений T и среднего нормального напряжения σ

Далее σ увеличивается до нуля, принимая незначительные положительные (около **20 МПа**) значения в районе вершины радиусной части ролика. 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 со следующими параметрами режима: **$R_{np} = 2,5$ мм, $P = 2500$ Н, $D_{\delta} = 50$ мм, $D_p = 95$ мм, $S = 0,21$ мм/об, $n = 630$ об/мин** [8].

Анализ показал, что, несмотря на оригинальный профиль деформирующего ролика, качественная картина распределения напряжений аналогична картине напряжений, возникающей при традиционном ППД.

Наибольшие значения интенсивности касательных напряжений t при ППД имеют место в зоне вершины волны перед деформирующим инструментом. При обработке роликом со специальным профилем 2-го типа зона максимальных значений t , начинается уже на поверхности контакта с цилиндрической частью ролика и проходит по передней контактной поверхности радиусной части ролика.

Весьма сложной является картина распределения скоростей деформации (рис. 1.25). Имеются множественные, различные по величине перепады всех компонент, сопровождаемые переходами между положительной и отрицательной областями.

Все компоненты скоростей деформаций на протяжении ОД изменяются практически синхронно. При этом, наибольшими значениями ($\xi_{xy} = 0,6$ с⁻¹), расположенными в районе перехода между цилиндрической и радиусной частями ролика, характеризуется касательный компонент.

Осевой ξ_x и радиальный ξ_y компоненты имеют несколько меньшие значения, лежащие в диапазоне **-0,4...0,4** с⁻¹, при этом радиальный компонент ξ_y на всем протяжении ОД по абсолютным значениям примерно равен осевому и имеет симметричный компоненту ξ_x характер распределения.

На протяжении передней контактной поверхности радиусной части ролика наблюдается увеличение радиального ξ_y и касательного ξ_{xy} и уменьшение осевого ξ_x компонент, носящее скачкообразный характер. Вследствие такого характера изменения в этой зоне наблюдаются различные по величине локальные экстремумы мгновенных значений компонент скоростей деформации.

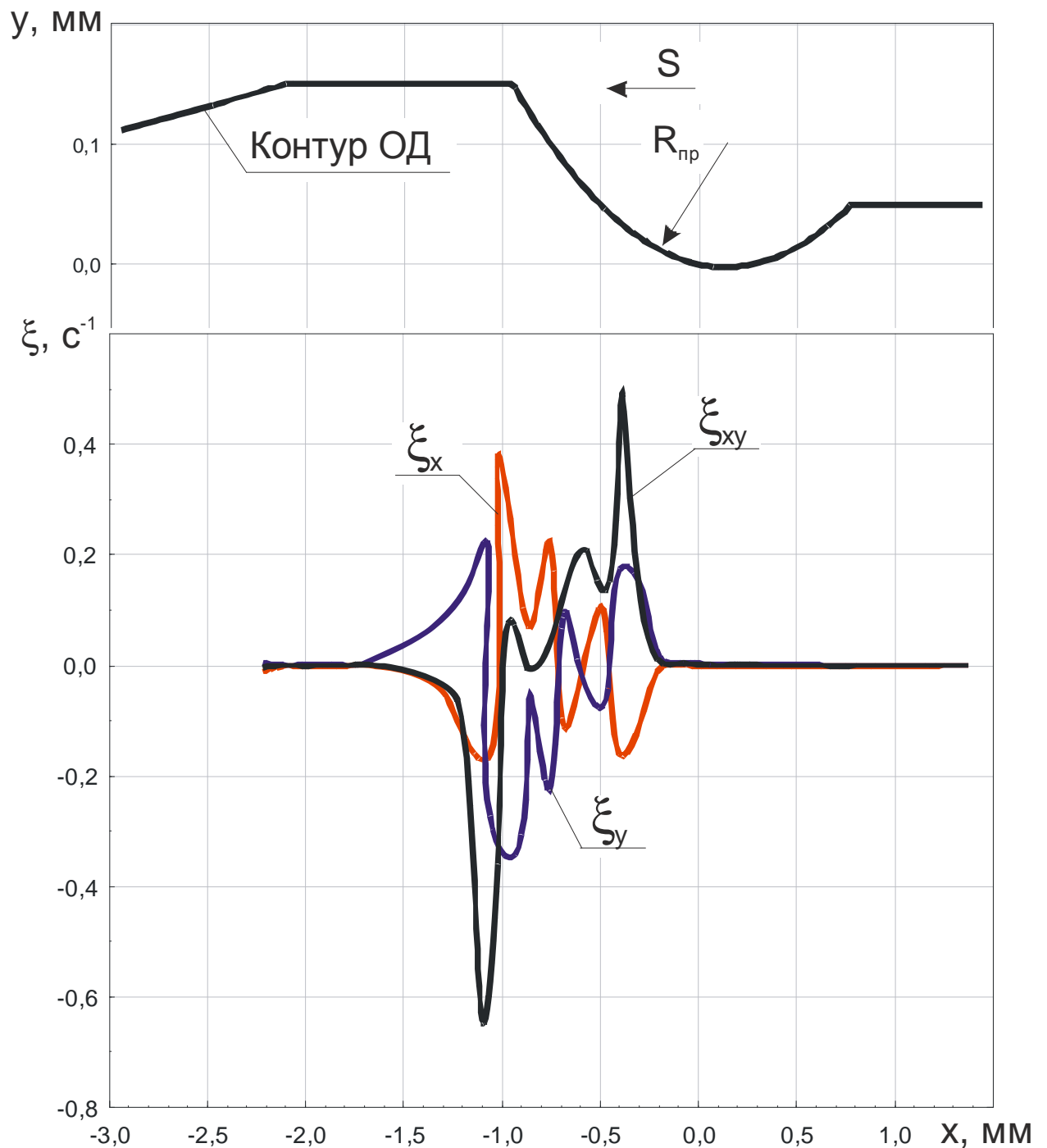


Рис. 1.25. Распределение компонент тензора скоростей деформации $[T\xi_{i,j}]$

В зоне выхода из ОД все компоненты принимают близкие к нулю значения.

Анализ показал, что при обработке специальным роликом с профилем 2-ого типа, также как и при традиционном ППД, имеется 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. 1.26).

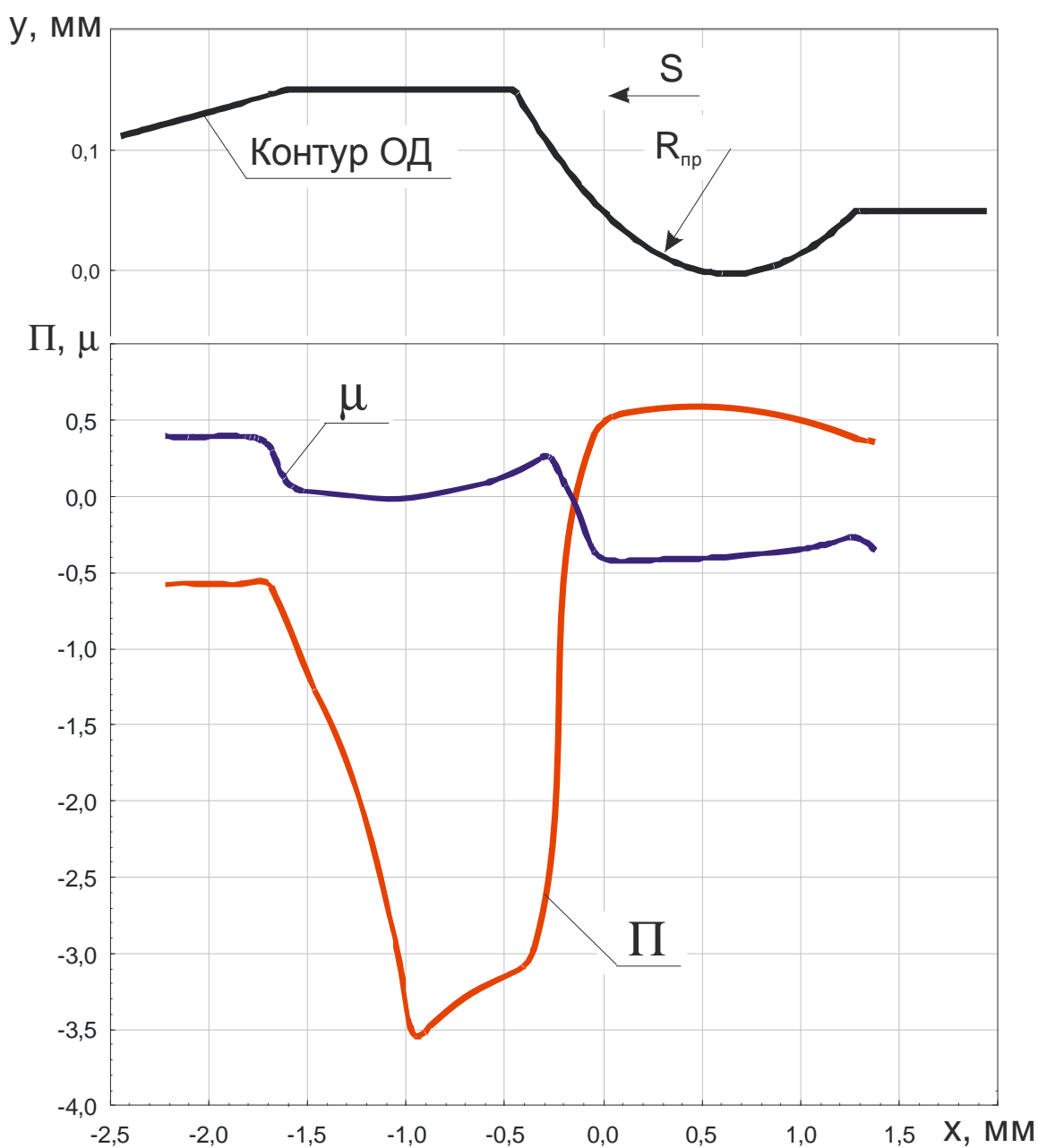


Рис. 1.26. Распределение показателя схемы напряженного состояния Π и параметра Лоде μ

Стартовое значение показателя схемы напряженного состояния составляет $\Pi = -0,577$, что соответствует началу накопления металлом деформации.

На первом участке квазимонотонной деформации – от точки входа в очаг деформации до точки, расположенной на поверхности контакта с цилиндрической частью ролика показатель схемы напряженного состояния изменяет свое значение от $\Pi = -0,577$ до $\Pi = -3,5$. Показатель вида напряженного состояния (показатель Лоде) уменьшает свое значение с $\mu = +0,5$ до нуля, а затем вновь увеличивается до $\mu = +0,25$ в зоне перехода между цилиндрической и радиусной частями ролика.

На втором участке квазимонотонной деформации, который начинается в зоне контакта с цилиндрической частью, а заканчивается в зоне передней контакта с передней радиусной частью ролика, показатель схемы возрастает до $\Pi = +0,6$ в районе вершины радиусной части ролика. Показатель Лоде, в свою очередь, монотонно уменьшает свое значение от $\mu = +0,25$ до $\mu = -0,4$.

На третьем участке – от вершины радиусной части ролика до выхода из ОД показатель схемы здесь монотонно уменьшается до уровня $\Pi = +0,4$, показатель Лоде, в свою очередь, монотонно возрастает до уровня $\mu = -0,3$.

Установлено, что наиболее интенсивный прирост степени деформации сдвига $\Delta\Lambda$ происходит в зоне перехода цилиндрической поверхности ролика в радиусную поверхность, в то время как наиболее интенсивный прирост степени исчерпания запаса пластичности $\Delta\Psi$ (СИЗП) наблюдается в зоне передней контактной поверхности вблизи вершины радиусной части ролика (рис. 1.27). Величина мгновенных значений степени деформации сдвига $\Delta\Lambda$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Delta\Psi$ изменяется скачкообразно.

Предварительный анализ показал, что при обработке роликом специального профиля 2-го типа накопление деформации и исчерпание запаса пластичности носит волнообразный характер. При этом накапливаются сравнительно небольшие значения степени деформации

сдвига $\Lambda = 0,52$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,1$ (рис. 1.28). Рост накопленных параметров прекращается в зоне вершины радиусной части ролика.

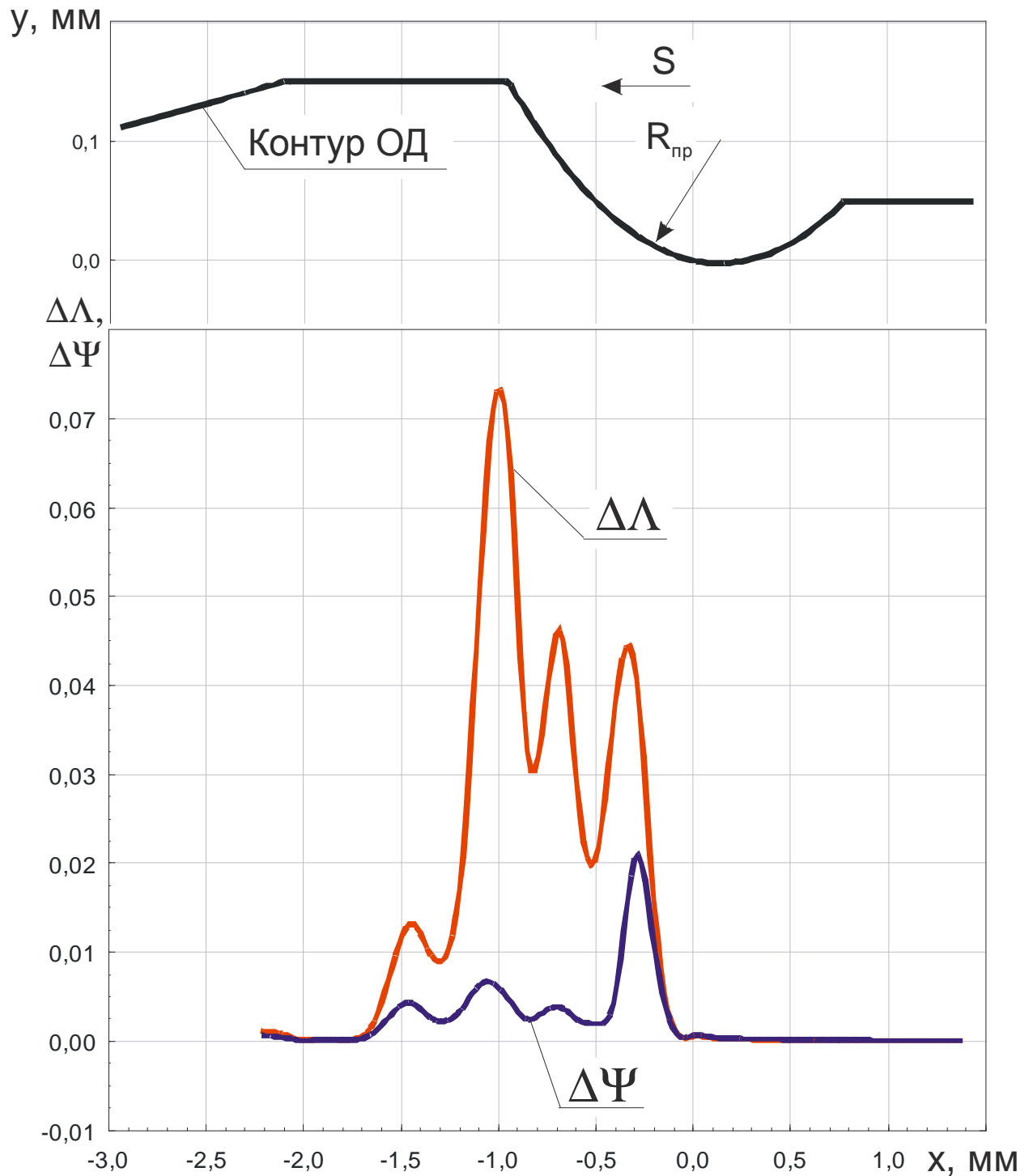


Рис. 1.27. Распределение мгновенных значений степени деформации сдвига $\Delta\Lambda$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Delta\Psi$

Так, например, при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием традиционными роликами с профильным радиусом $R_{пр} = 1,6...10$ мм, значения степени деформации сдвига лежат в диапазон $\Lambda = 0,2...1$, а значения степени истощения запаса пластичности находятся в диапазоне $\Psi = 0,1...0,9$.

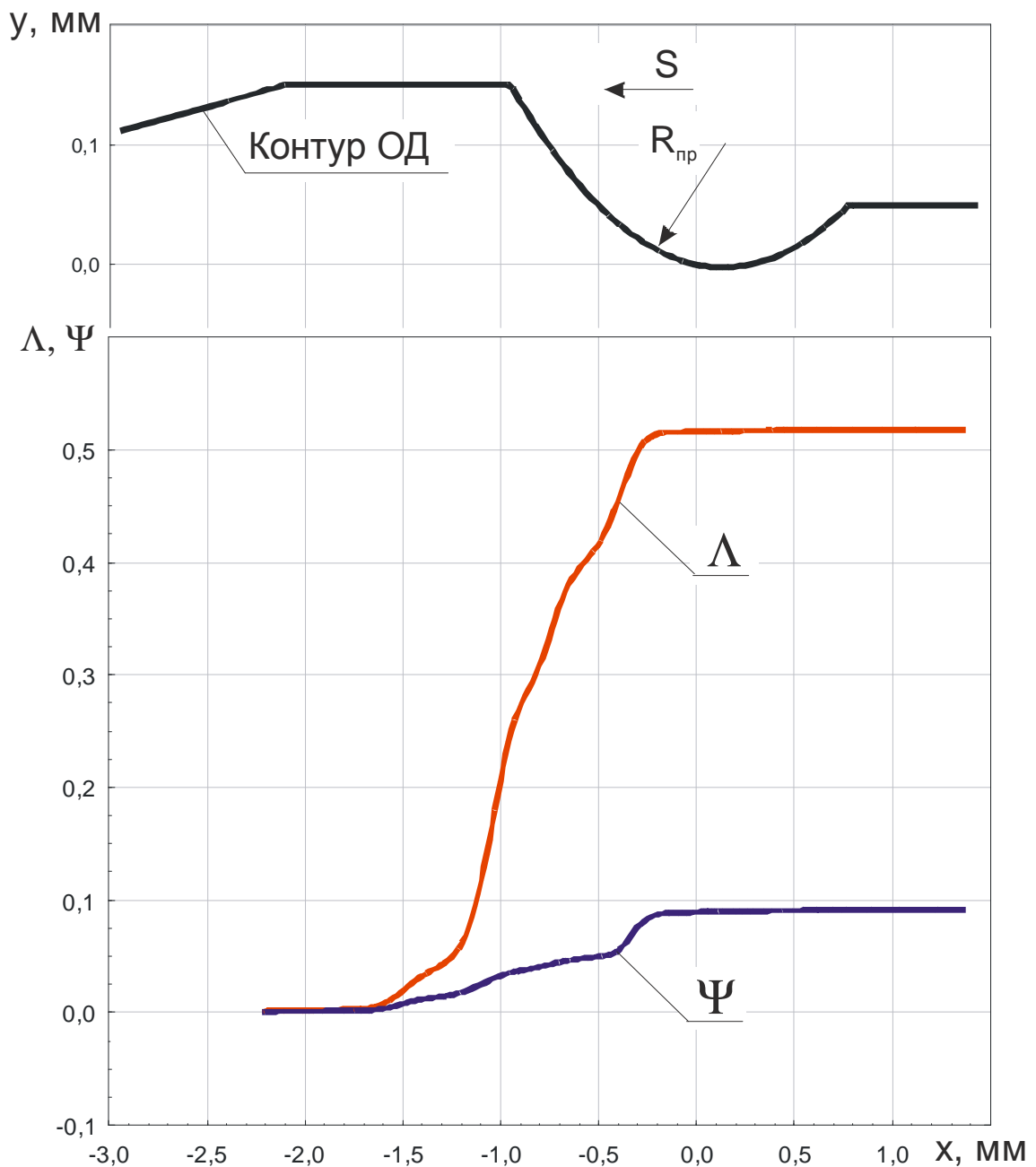


Рис. 1.28. Распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени истощения запаса пластичности Ψ ($\Psi = 1$ - полное истощение запаса пластичности)

Одной из особенностей обработки роликом с профилем 2-го типа является соотношение итоговых накопленных значений Λ/Ψ , составляющее 5,2, в то время как при обработке деталей ППД традиционными роликами это соотношение не превышает $\Lambda/\Psi = 1,5$.

Как было отмечено выше, практически такое же соотношение степени деформации сдвига к степени исчерпания запаса пластичности $\Lambda/\Psi = 4,6$ наблюдается при обработке способом размерного совмещенного обкатывания, который является оригинальной разновидностью совмещенной обработки резанием и традиционным ППД роликом [1].

Установлено, что при обработке роликом специального профиля 2-го типа программа нагружения имеет вид, схожий с полученным для случая обработки традиционным ППД (рис. 1.29).

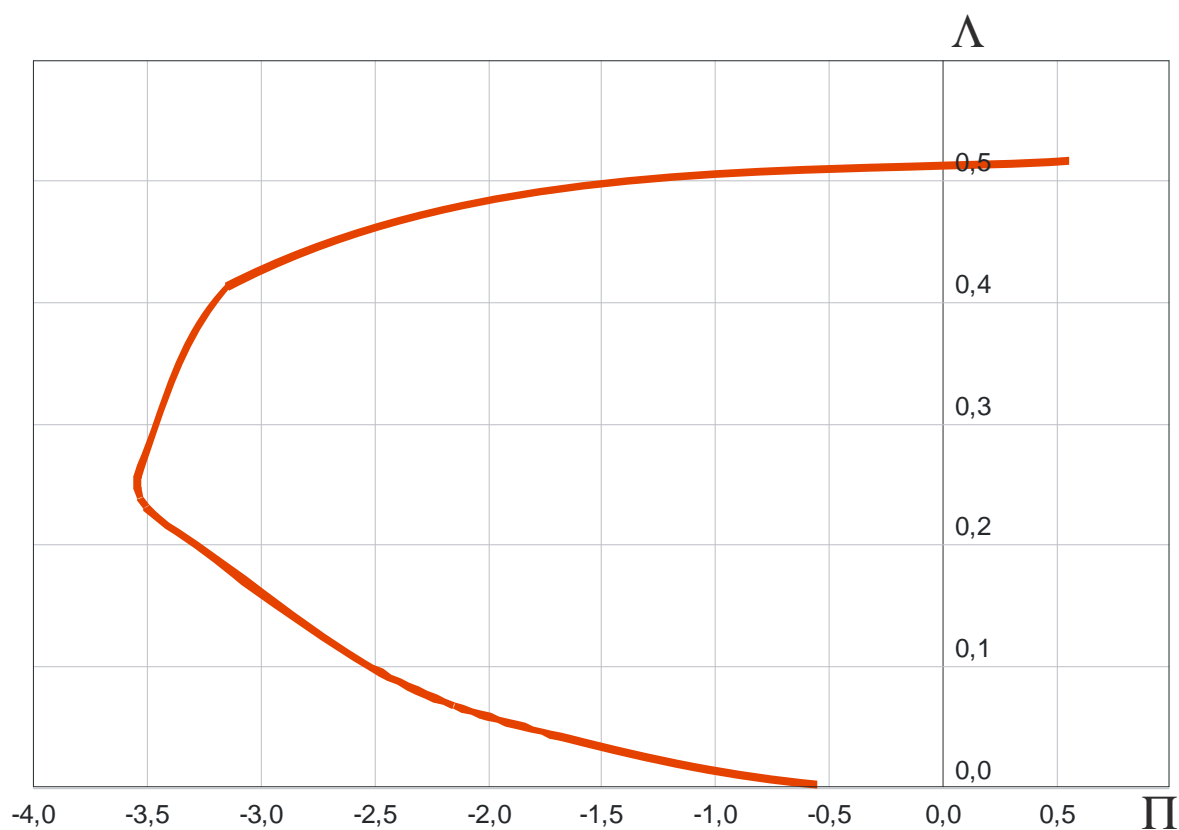


Рис. 1.29. Зависимости накопленной степени деформации Λ от показателя схемы напряженного состояния Π (программы нагружения)

В то же время, представленная программа нагружения обнаруживает участки, близкие к вертикальным, что свидетельствует о возможности наноструктурирования металла поверхностного слоя при определенных режимах обработки роликом специального профиля 2-го типа.

Ниже представлены распределения компонент тензора напряженно-деформированного состояния, возникающего в ОД вдоль ЛТ, формирующей поверхность детали при упрочняющей обработке роликом специального профиля 3-го типа (рис. 1.30 - 1.36).

В зоне входа в очаг деформации (в точке зарождения пластической волны) все компоненты напряженно-деформированного состояния, кроме осевого имеют околонулевые значения (рис. 1.30). Осевой компонент в этой зоне характеризуется сжимающими напряжениями порядка **-100 МПа**, что свидетельствует о том, что размеры зоны напряженного состояния превышают размеры зоны пластического течения металла.

Сжимающие нормальные напряжения по всем направлениям нарастают фактически вдоль всей передней внеконтактной поверхности и достигают своих максимальных сжимающих значений **-500...-600 МПа** в вершине пластической волны (рис. 1.30). Далее происходит некоторая разгрузка, локальный экстремум которой приходится на вершину 1-го деформирующего элемента.

2-й экстремум компонент напряжений, характеризуемый примерно такими же значениями сжимающих напряжений (**-500...-600 МПа**), приходится на зону передней контактной поверхности 2-го деформирующего элемента.

Следует отметить, что в 1-ом экстремуме сжимающих напряжений наибольшее значение имеет осевой компонент, в то время как во 2-ом экстремуме превалирует радиальный.

Наличие двух ярко выраженных экстремумов сжимающих напряжений обусловлено воздействием 2-х деформирующих элементов ролика со специальным профилем 3-его типа.

По мере продвижения вдоль деформирующих элементов наблюдаются значительные (до 700 МПа) перепады компонент напряжений, происходящие на сравнительно коротких участках длиной $0,5..1 \text{ мм}$.

Касательный компонент напряженного состояния σ_{xy} имеет аналогичный нормальным характер распределения, однако отличается меньшими значениями, которые в экстремумах составляют около $\sigma_{xy} = -200 \text{ МПа}$.

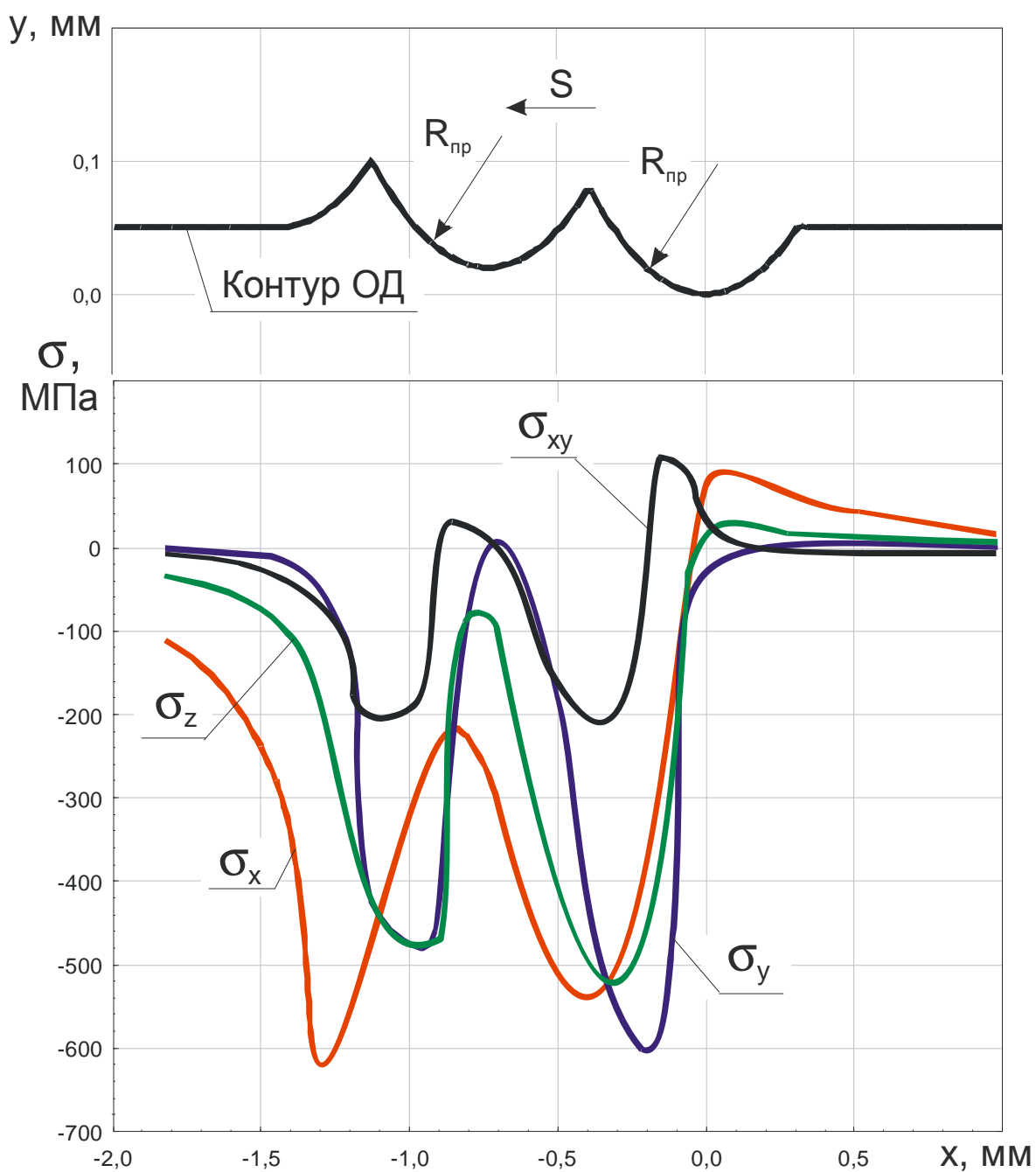


Рис. 1.30. Распределение компонент тензора напряжений $[T\sigma]$

Изменение интенсивности касательных напряжений T и среднего нормального напряжения σ носит схожий характер и также, как и компоненты напряжений обнаруживает два экстремума (рис. 1.31).

Интенсивность касательных напряжений T достигает максимальной величины **270 МПа** в зоне передней внеконтактной поверхности.

Локальный экстремум величиной **60 МПа** наблюдается в районе 1-го деформирующего элемента.

Затем T образует еще один, более протяженный по длине экстремум, характеризуемый значениями **220 МПа** и расположенный в районе от задней контактной поверхности 1-го до передней контактной поверхности 2-го деформирующего элемента. Затем T постепенно уменьшается к точке выхода из очага деформации.

Среднее нормальное напряжение σ почти на всем протяжении ОД, вплоть до вершины 2-го деформирующего элемента имеет отрицательные значения, далее, до точки выхода из ОД, наблюдаются небольшие положительные значения.

Два экстремума σ величиной **-500 МПа** и **-540 МПа** соответственно, расположены в зонах передних контактных поверхностей деформирующих элементов.

Характер распределения средних нормальных напряжений говорит о том, что большая часть металла очага деформации находится в условиях сжатия.

Картина распределения скоростей деформации в целом аналогична картине напряженного состояния (рис. 1.32).

Все компоненты скоростей деформаций на протяжении ОД изменяются практически синхронно, экстремумы обнаруживаются в районах вершин пластических волн от обоих деформирующих элементов.

Имеют место феноменально большие значения компонент скоростей деформаций. Так наибольшими значениями ($\xi_{xy} = -3,5..3,0 \text{ c}^{-1}$) характеризуется касательный компонент.

Осевой ξ_x и радиальный ξ_y компоненты хотя и имеют несколько меньшие по сравнению с касательным значения, однако также характеризуются феноменально большими значениями, лежащими в диапазоне $-1,5...1,5 \text{ c}^{-1}$.

В зоне выхода из ОД все компоненты принимают близкие к нулю значения.

Анализ показал, что при обработке специальным роликом с профилем 3-ого типа, также как и при традиционном ППД, имеется 5 участков квазимонотонной деформации (рис. 1.33), в то время как при обработке традиционным ППД обнаруживается лишь 3 участка.

Стартовое значение показателя схемы напряженного состояния составляет $\Pi = -0,577$, что соответствует началу накопления металлом деформации.

На первом участке квазимонотонной деформации – от точки входа в очаг деформации до точки, расположенной на передней внеконтактной поверхности 1-го деформирующего элемента показатель схемы напряженного состояния изменяет свое значение от $\Pi = -0,577$ до $\Pi = -2,6$. Показатель вида напряженного состояния (показатель Лоде) уменьшает свое значение с $\mu = +0,4$ до $\mu = -0,1$.

На втором участке квазимонотонной деформации, который заканчивается в зоне вершины 1-го деформирующего элемента, показатель схемы возрастает до $\Pi = -0,6$. Показатель Лоде, в свою очередь, монотонно увеличивает свое значение от $\mu = -0,1$ до $\mu = +0,4$.

На третьем участке квазимонотонной деформации, расположенном от вершины 1-го деформирующего элемента до точки, расположенной на передней контактной поверхности 2-го деформирующего элемента показатель схемы монотонно уменьшается до уровня $\Pi = -2,5$, показатель Лоде, в свою очередь, приобретает околонулевое значение.

На четвертом участке происходит рост показателей до уровней $\Pi = 0,7$, $\mu = 0,3$.

По окончании 5-го участка, в точке выхода из ОД показатели приобретают значения $\Pi = 0,5$, $\mu = -0,3$.

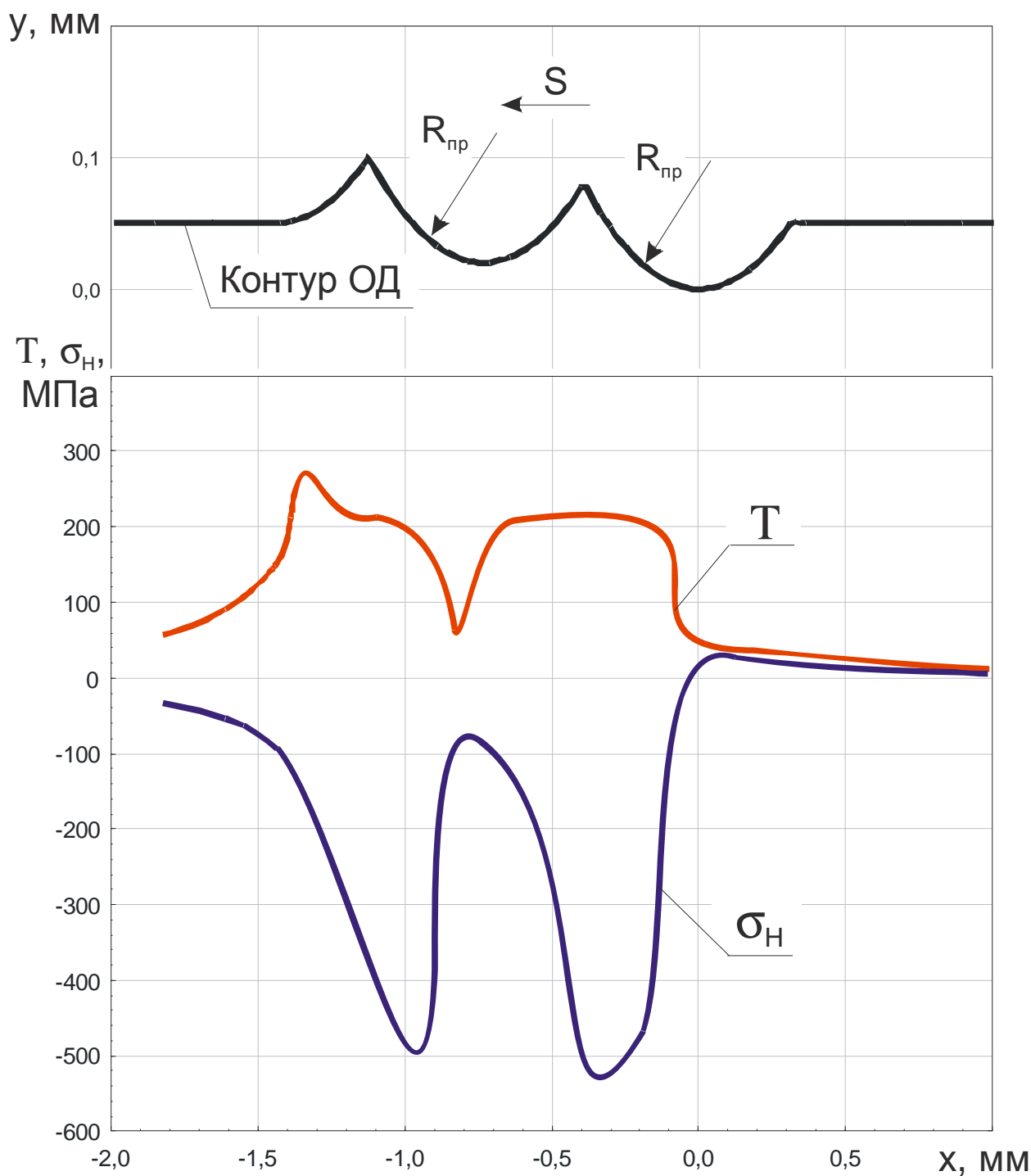


Рис. 1.31. Распределение интенсивности касательных напряжений T и среднего нормального напряжения σ

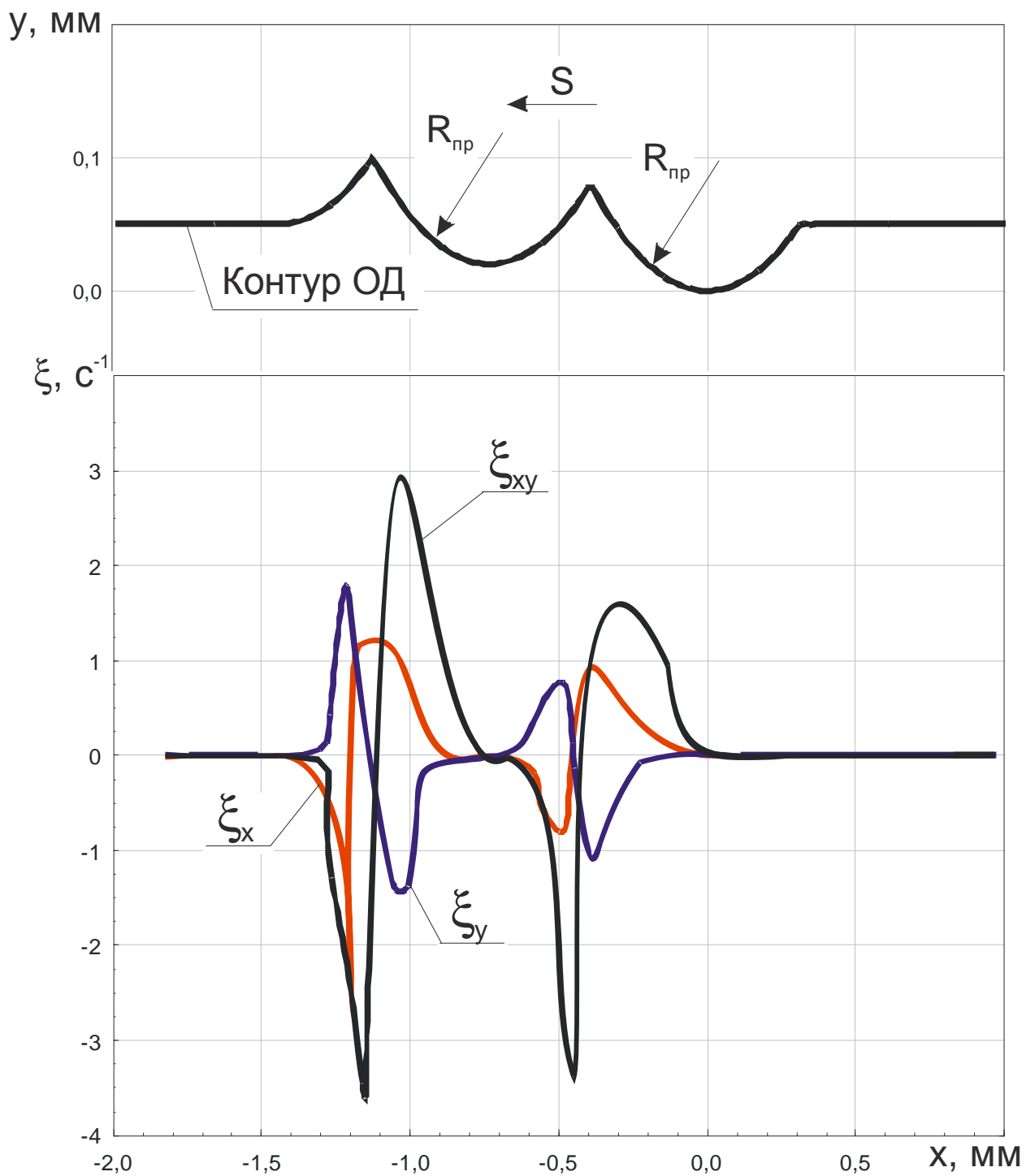


Рис. 1.32. Распределение компонент тензора скоростей деформации $[T_{\xi_{i,j}}]$

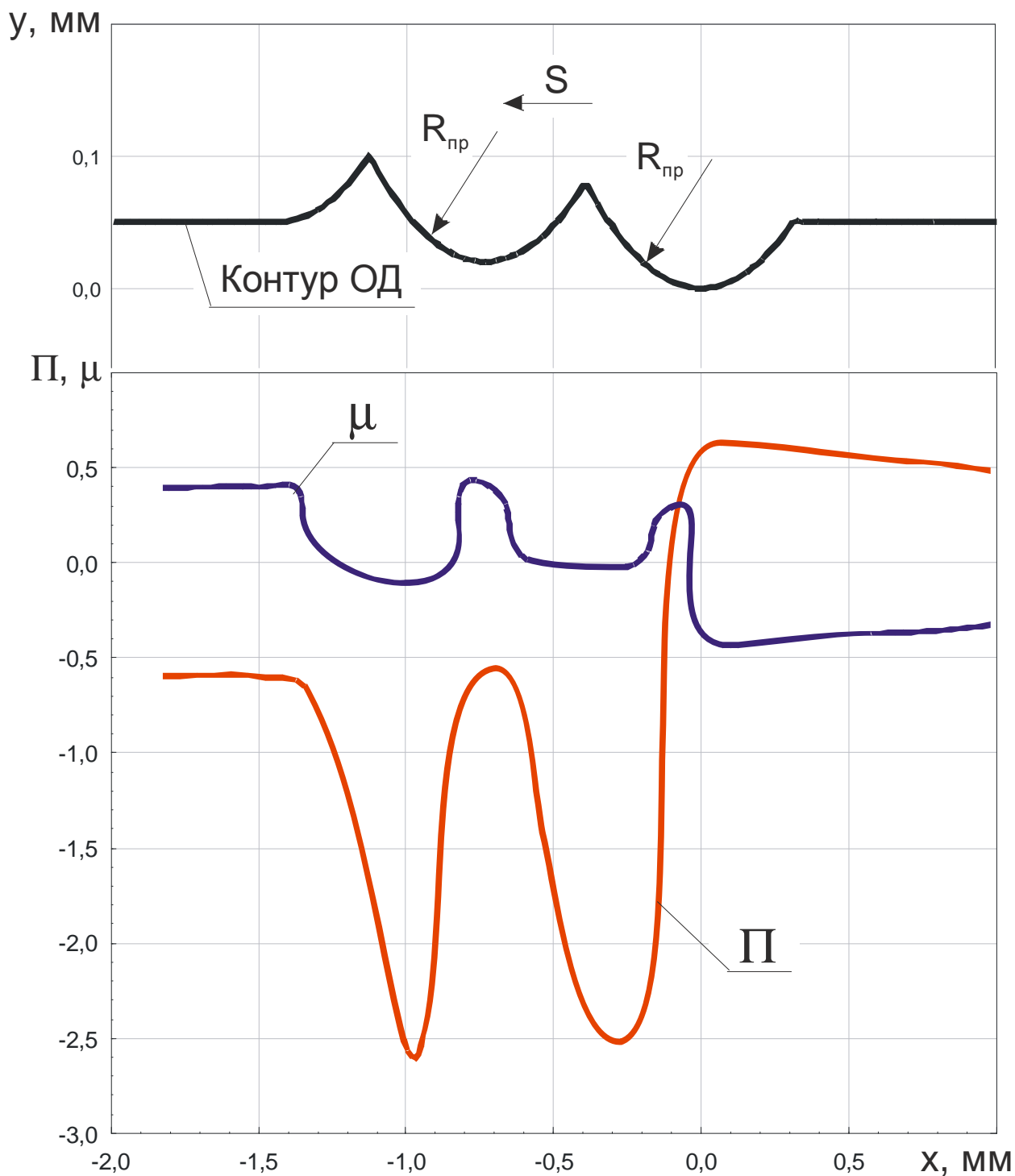


Рис. 1.33. Распределение показателя схемы напряженного состояния Π и параметра Луде μ

Установлено, что наиболее интенсивный прирост степени деформации сдвига ΔA происходит в зонах вершин пластических волн от деформирующих элементов, в то время как наиболее интенсивный прирост степени истощения запаса пластичности $\Delta \Psi$ (СИЗП) наблюдается в зоне

передней внеконтактной поверхности и в зоне задней контактной поверхности 1-го деформирующего элемента (рис. 1.34).

Анализ показал, что при обработке роликом специального профиля 3-го типа накопление деформации и исчерпание запаса пластичности носит двухступенчатый характер. При этом накапливаются сравнительно значительные степени деформации сдвига $\Lambda = 3..3,2$ при докритических значениях степени исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,6..0,7$ (рис. 1.35). Рост накопленных параметров практически прекращается в районе вершины 2-го деформирующего элемента.

Соотношение итоговых накопленных значений Λ/Ψ при обработке роликом с профилем 3-го типа, составляет 5, в то время как для традиционного ППД, как было отмечено, это соотношение не превышает $\Lambda/\Psi = 1,5$.

Установлено, что при обработке роликом специального профиля 3-го типа программа нагружения также имеет две выраженных ступени, обусловленные наличием 2-х деформирующих элементов (рис. 1.36).

Распределение накопленных значений параметров Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя представлено на рис. 1.37. Градиенты степени деформации сдвига и СИЗП по глубине упрочненного слоя при этом, имеют весьма значительные значения:

$$\Gamma(\Lambda) = \frac{\Lambda}{h} = \frac{3}{0,11} = 27,27; \quad \Gamma(\Psi) = \frac{\Psi}{h} = \frac{0,6}{0,11} = 5,45.$$

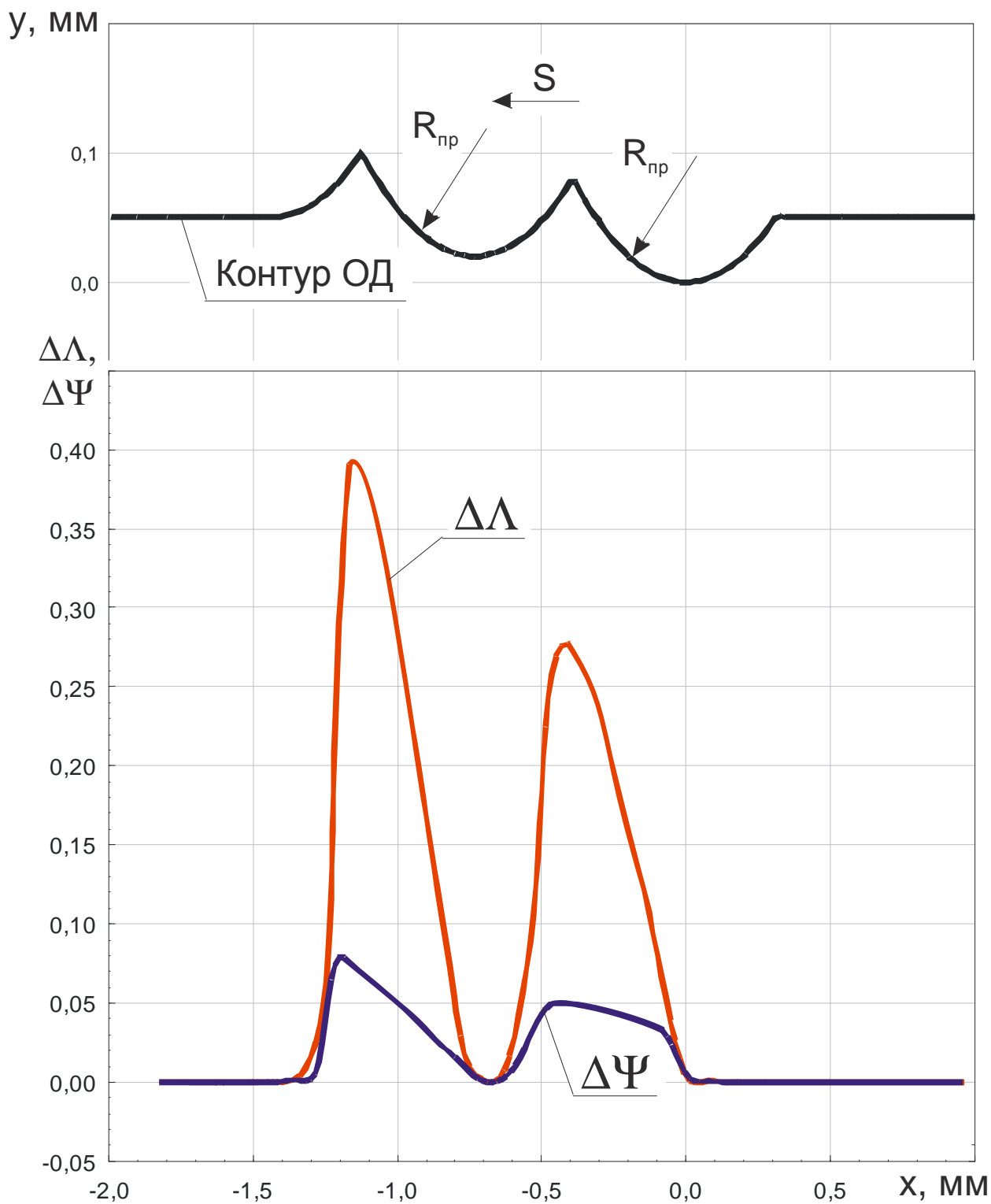


Рис. 1.34. Распределение мгновенных значений степени деформации сдвига $\Delta\Lambda$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Delta\Psi$

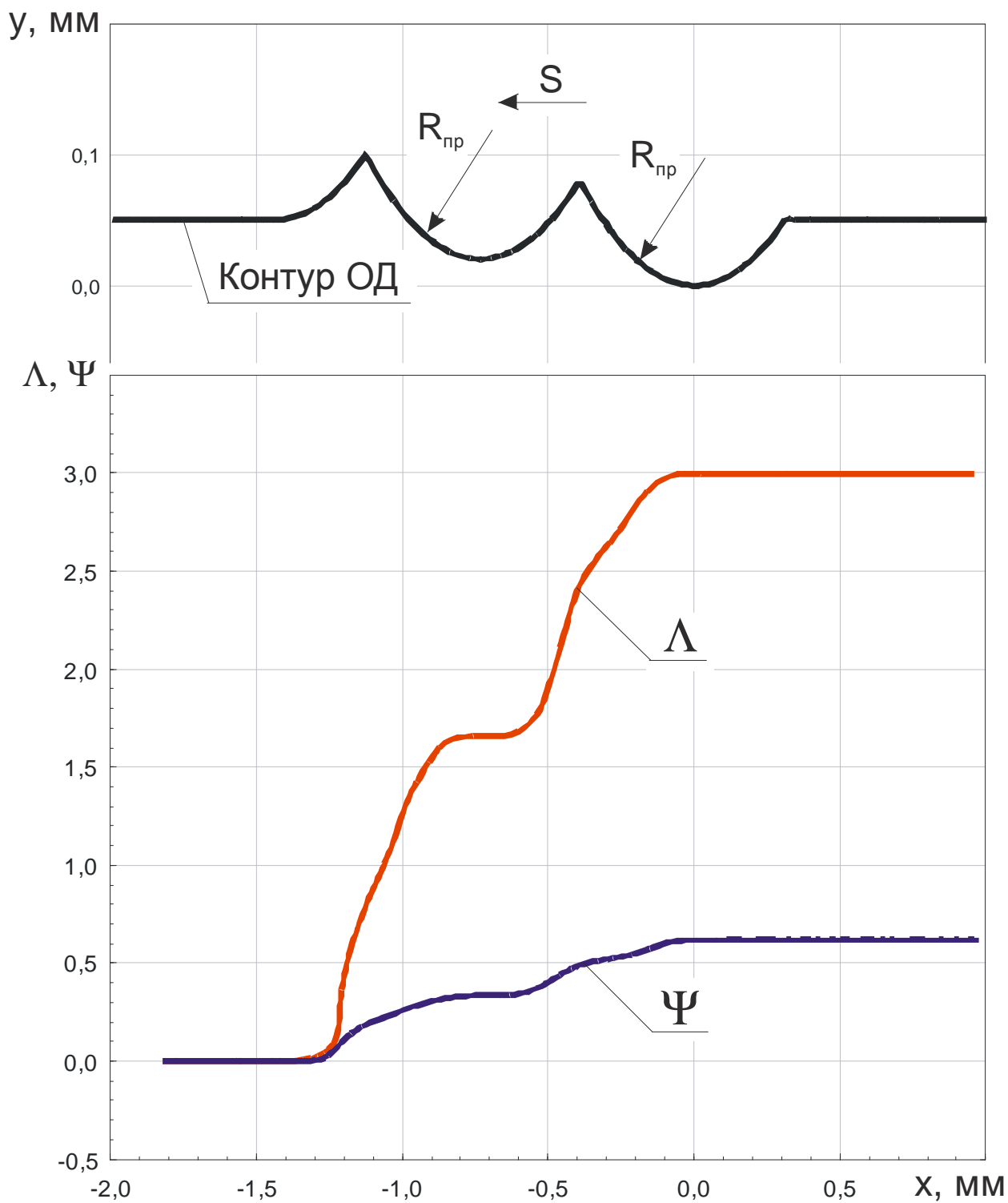


Рис. 1.35. Распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени истощения запаса пластичности Ψ ($\Psi = 1$ - полное истощение запаса пластичности)

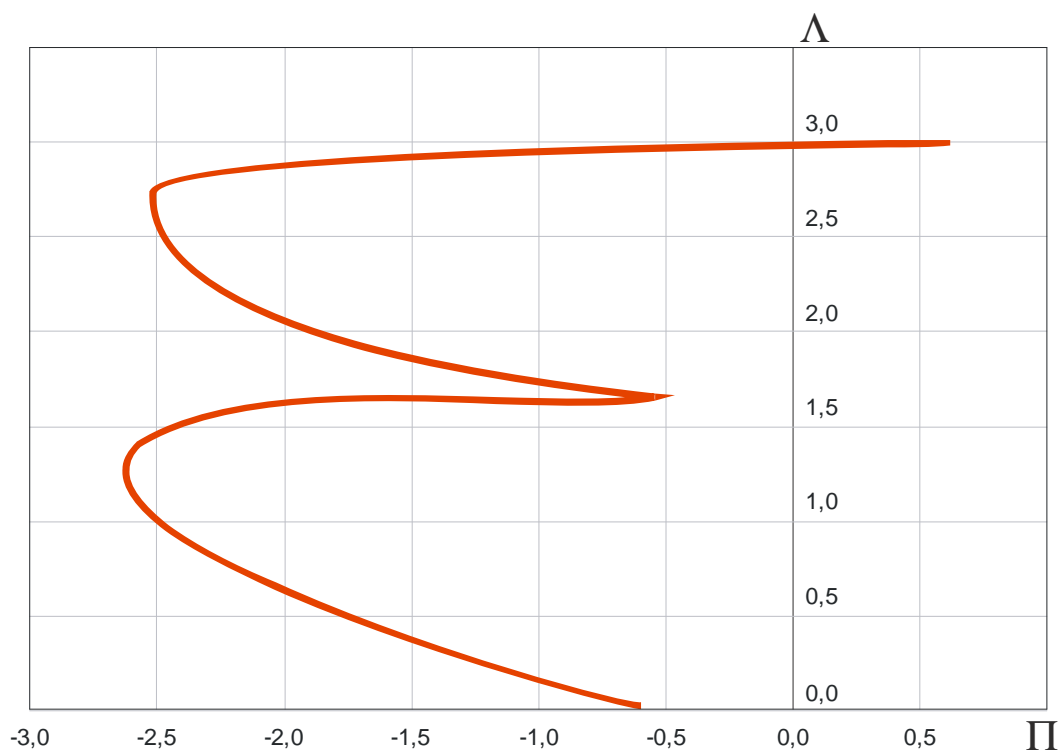


Рис. 1.36. Зависимости накопленной степени деформации Λ от показателя схемы напряженного состояния Π (программы нагружения)

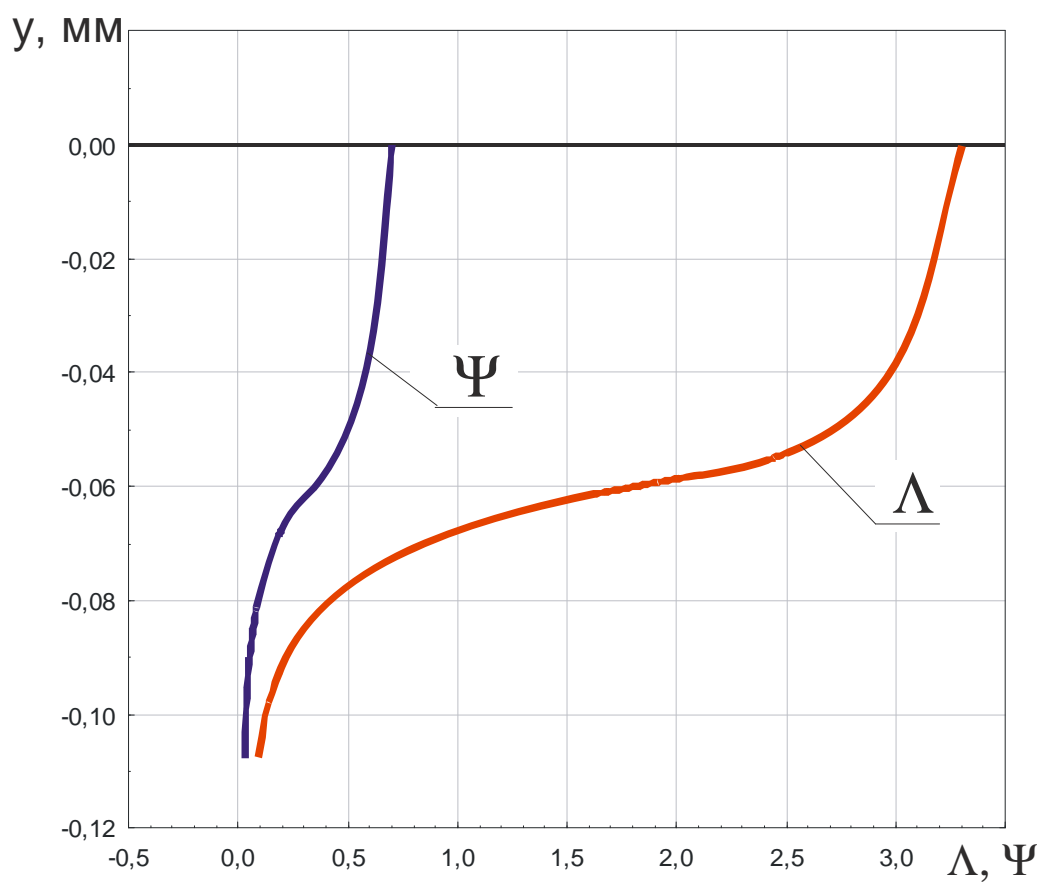


Рис. 1.37. Накопленные значения Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя

1.2. Разработка аналитических моделей программ нагружения, обеспечивающих большое значение накопленной степени деформации сдвига при докритических значениях степени исчерпания запаса пластичности

1.2.1. Модели программ нагружения, обеспечивающие интенсивную пластическую деформацию поверхностного слоя без его разрушения

Нанесение покрытий и обработка поверхностного слоя высокоэнергетическими источниками поверхностного слоя позволяют существенно повысить эксплуатационные свойства деталей машин.

В тоже время известно, что в некоторых случаях эти процессы способствуют появлению и негативных, с точки зрения эксплуатационных свойств, факторов, например, растягивающих остаточных напряжений.

В связи с этим большой интерес представляют комбинированные методы упрочнения поверхностного слоя, с применением не только нанесения покрытий и обработки высокоэнергетическими источниками, но и с совместным применением методов деформационного упрочнения.

Ранее (см. отчет по этапу №1) было показано, что ключевым механизмом формирования свойств поверхностного слоя при пластическом формоизменении является программа нагружения, представляющая собой зависимость степени деформации сдвига Δ от показателя напряженного состояния Π .

Программа нагружения комплексно характеризует накопление деформации в условиях изменения напряженного состояния в очаге деформации в процессах обработки и эксплуатации и может использоваться для оценки состояния металла поверхностного слоя.

Таким образом, для проектирования технологических процессов деформационного наноструктурирования требуется получение

аналитического описания программ нагружения, возникающих на стадиях обработки.

Закономерности накопления степени деформации в условиях изменения показателя напряженного состояния можно выявить на основе распределения параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. При этом для получения программ нагружения, характерных для деформационного наноструктурирования, целесообразно использовать результаты для хорошо изученных методов, например, для равноканального углового прессования (РКУП).

Общая схема процесса равноканального углового прессования представлена на рис. 1.38.

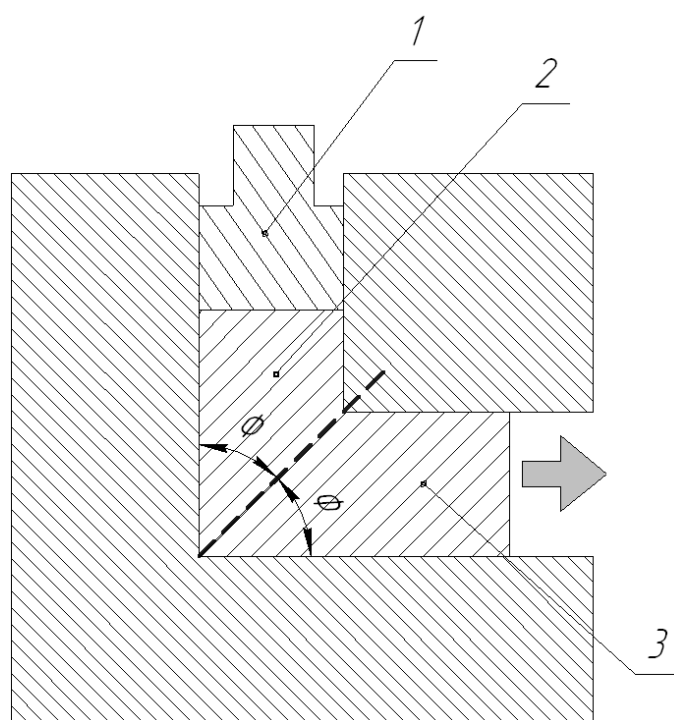


Рис. 1.38. Схема процесса РКУП: 1 – пуансон; 2 – рабочий канал;
3 – выходной канал.

При реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися обычно под углом 90° . При необходимости, в случае труднодеформируемых материалов, деформация осуществляется при

повышенных температурах или при увеличенных углах пересечения каналов. При этом особые требования предъявляются к термостойкости и прочности оснастки.

Для осуществления РКУП труднодеформируемых материалов также можно внешний угол сопряжения каналов выполнить в виде дуги с некоторым радиусом или хорды этой дуги. Однако, как показали исследования, в этом случае снижается величина произведенной деформации, то есть снижается эффективность метода РКУП.

Несмотря на большое количество работ по деформационному наноструктурированию методом РКУП на сегодняшний день, к сожалению, практически отсутствуют развитые модели процессов, происходящих в металле при РКУП на уровне формирования напряженно-деформированного состояния и формирования механических свойств в очаге деформации, на основании которых возможно построение описания формирования программ нагружения деформационного наноструктурирования.

Существующие модели характеризуются рассмотрением отдельных режимов и отдельных параметров состояния материала. В качестве примера можно привести модель накопления деформации при РКУП [9], схематизация процесса показана на рис. 1.39.

$$\Delta\Gamma = 2 \operatorname{ctg} \Phi, \quad (1.16)$$

где Φ – половина угла пересечения каналом, $\Delta\Gamma$ – накопленная степень деформации.

В соответствии с этой моделью каждый проход при наиболее часто используемом угле пересечения каналов 90° соответствует накопленной степени деформации, примерно равной 1. При увеличении угла с 90° до 120° расчетная интенсивность деформации сдвига за 1 цикл снижается с 200% до 130% [10].

Помимо существенного осложнения расчета накопленных свойств при обработке, отсутствие развитых моделей накопления свойств в очаге деформации не позволяет определить условия, обуславливающие

деформационное наноструктурирование при пластическом деформировании. Это приводит к невозможности проектирования новых методов деформационного наноструктурирования.

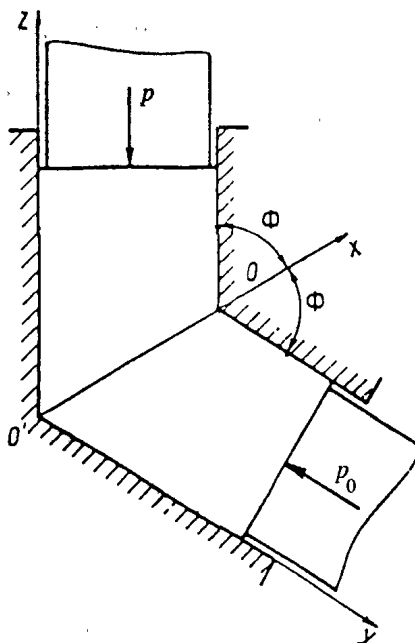


Рис. 1.39. Схема пластической деформации при равноканальном угловом прессовании: Φ – половина угла пересечения каналом, p – давление прессования, p_0 – противодействие со стороны выходного канала

Для анализа формирования напряженно-деформированного состояния при деформационном наноструктурировании и описания возникающей программы нагружения выполнено конечно-элементное моделирование РКУП с углом пересечения каналов матрицы 90° и 110° (рис. 1.40). Также в моделях принят радиус скругления при пересечении каналов.

Моделирование проводилось в плоско-деформированной постановке, коэффициент трения между матрицей и образцом принималось по результатам анализа публикаций о РКУП.

Результаты конечно-элементного моделирования показаны на рис. 1.41-1.50.

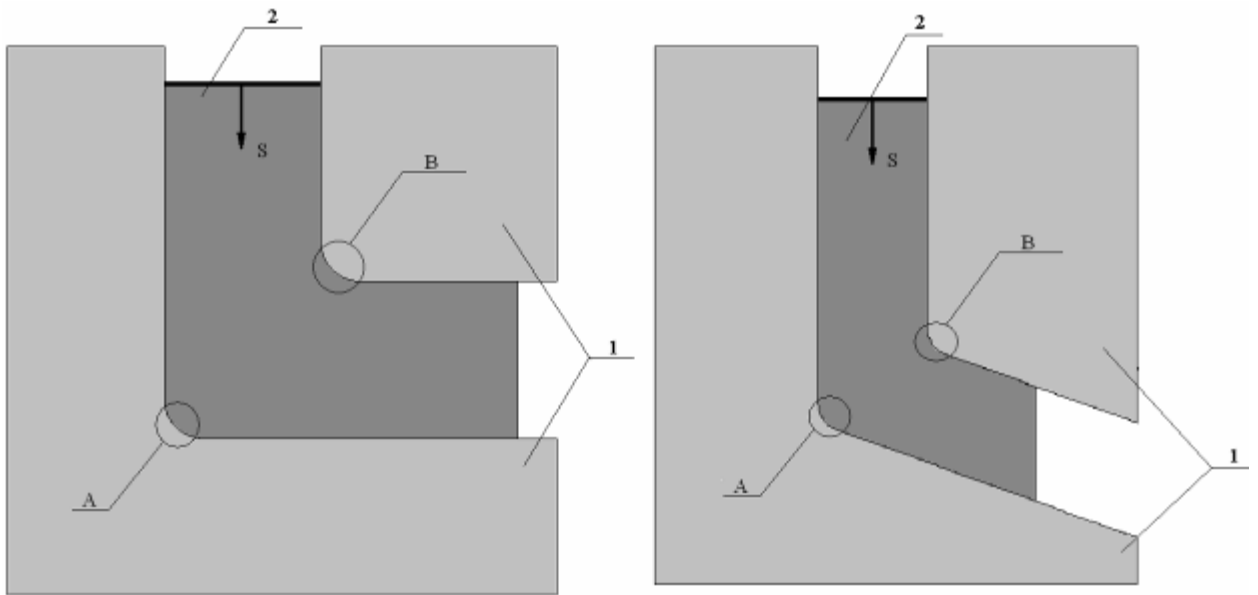


Рис. 1.40. Общий вид моделей. 1 – матрица, 2 – деформируемый образец, А – зона внутреннего угла матрицы, В – зона наружного угла матрицы. S – перемещение заготовки, принято $S = 0,005\text{м}$

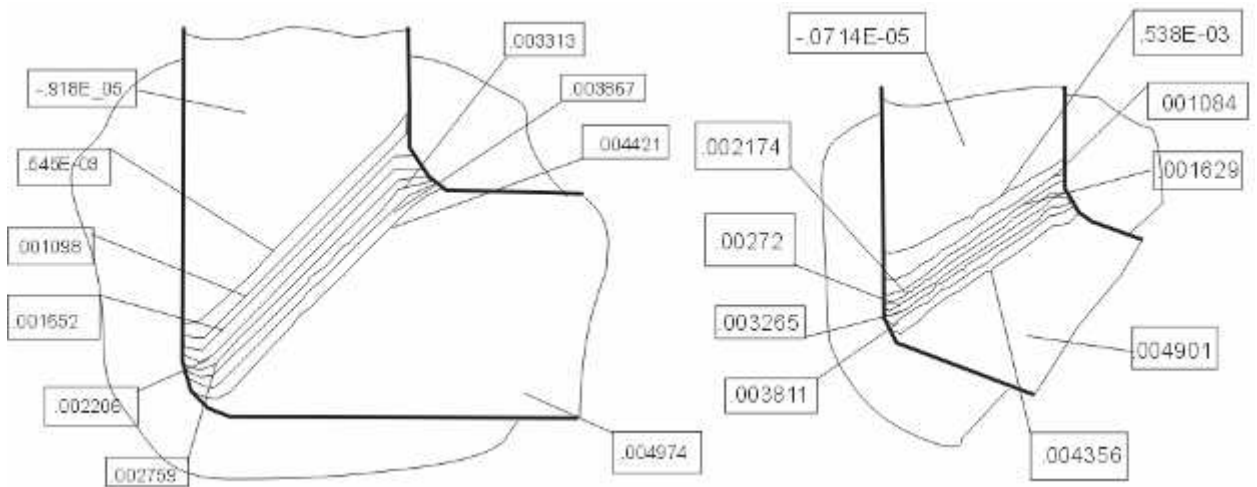


Рис. 1.41. Перемещения по оси X, м

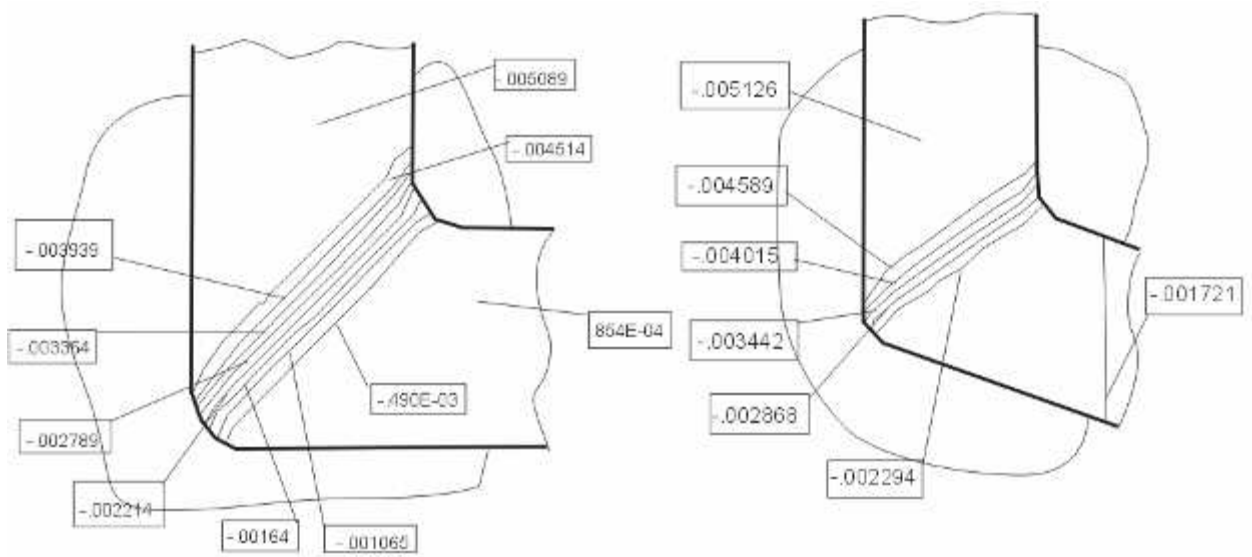


Рис. 1.42. Перемещения по оси Y, м

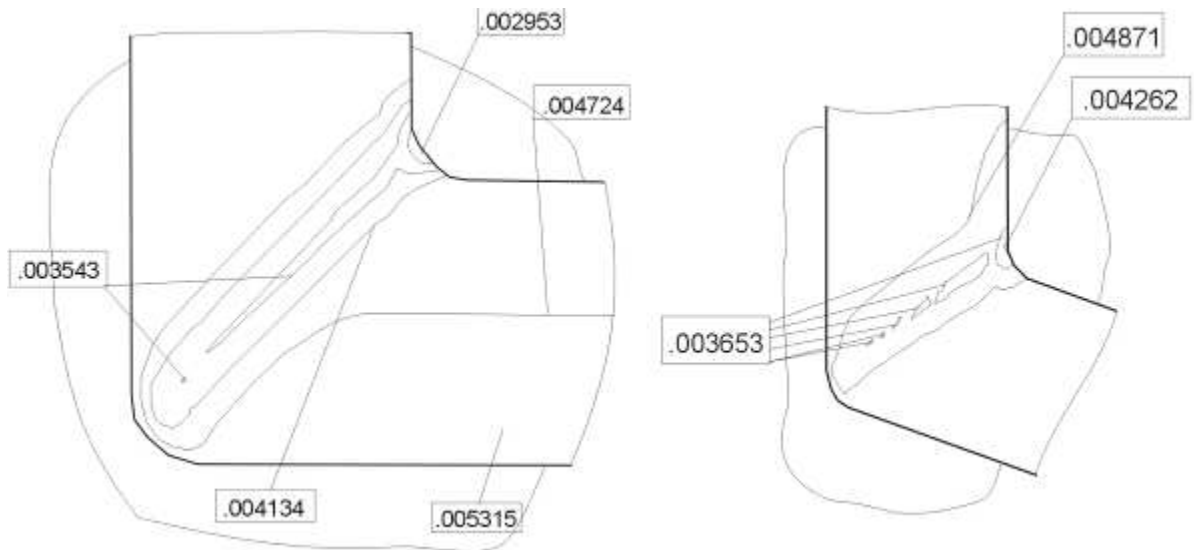


Рис. 1.43. Суммарные перемещения, м

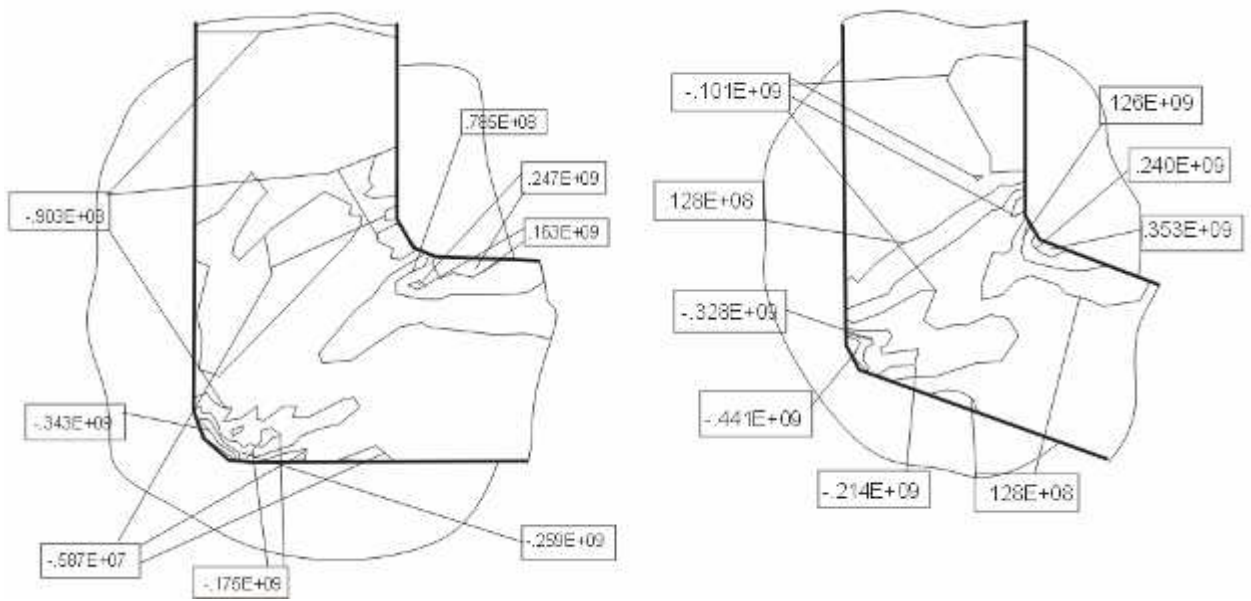


Рис. 1.44. Напряжения по оси X, Па

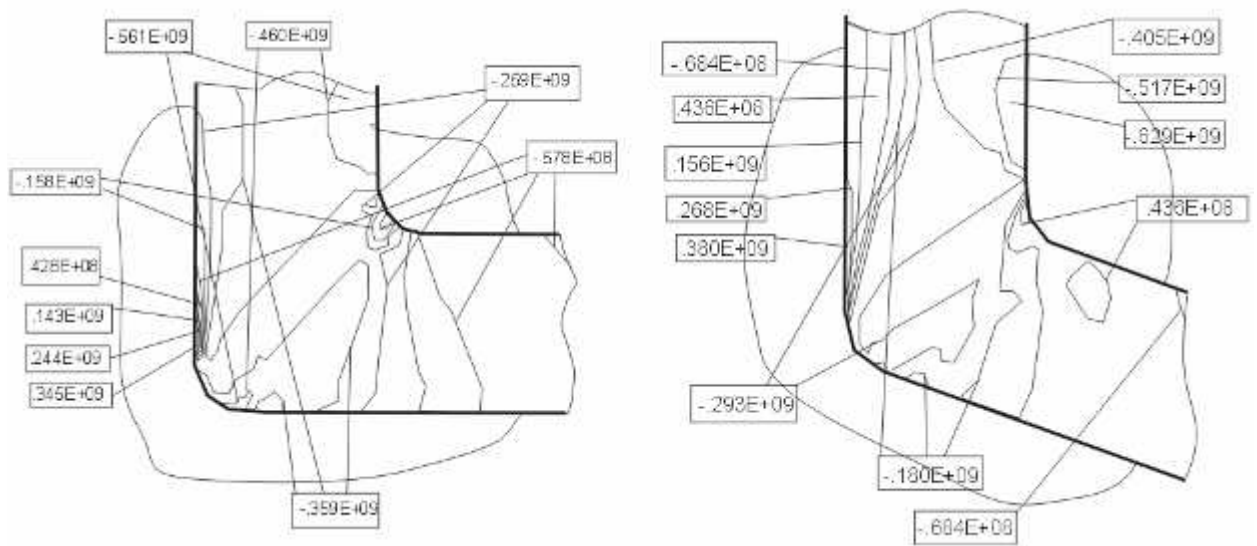


Рис. 1.45. Напряжения по оси Y, Па

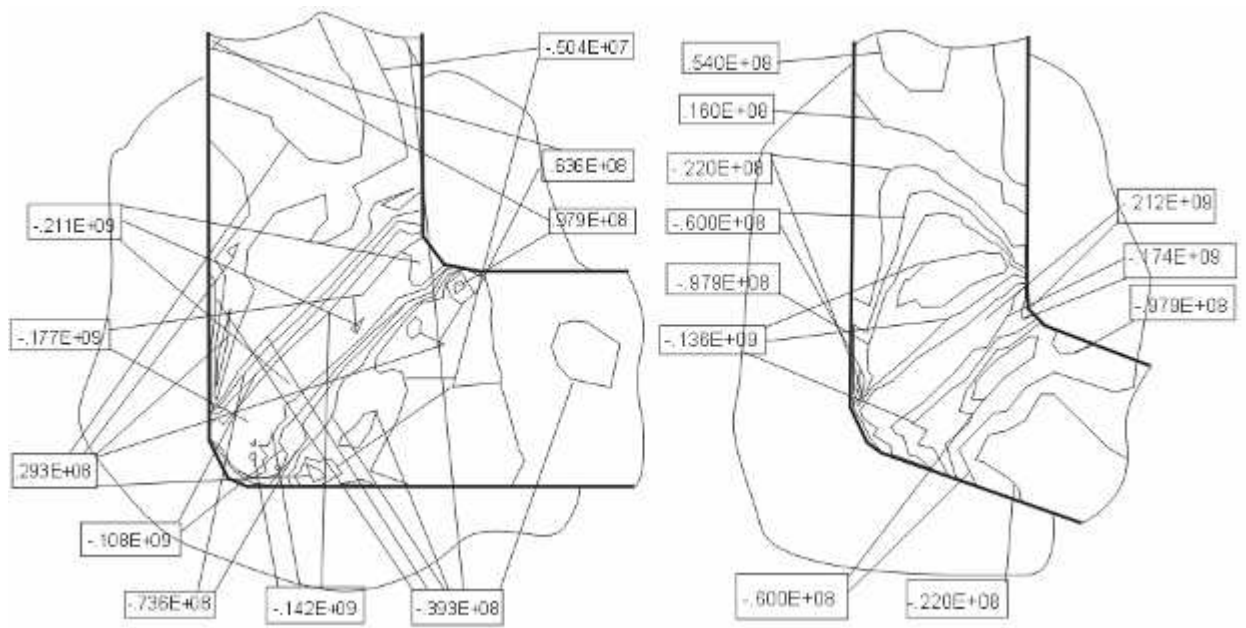


Рис. 1.46. Напряжения по оси XY, Па

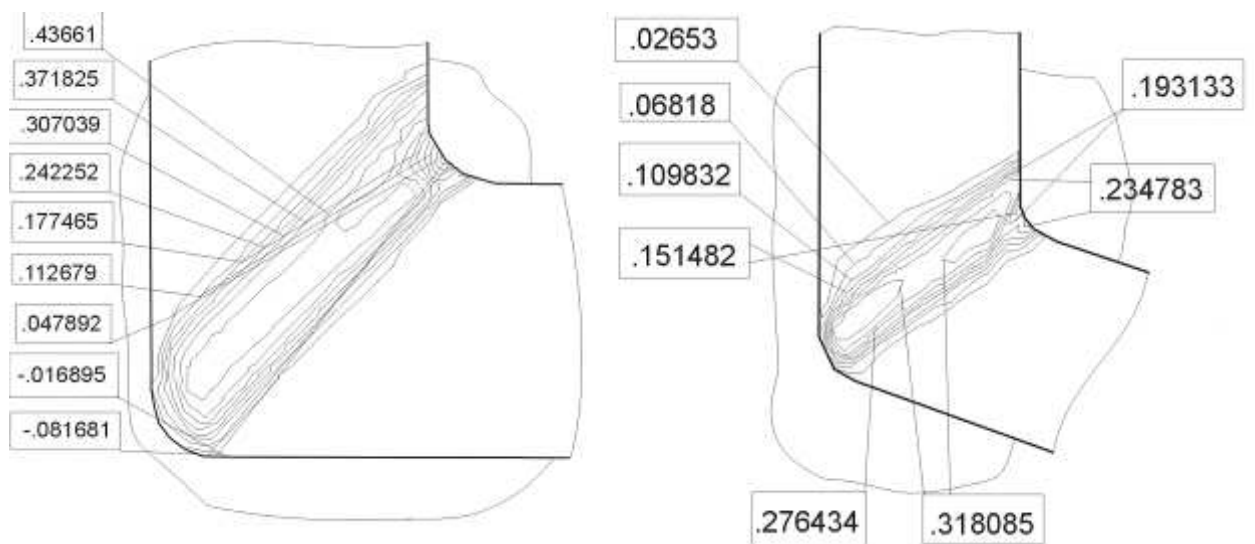


Рис. 1.47. Интенсивность пластических деформаций по оси X

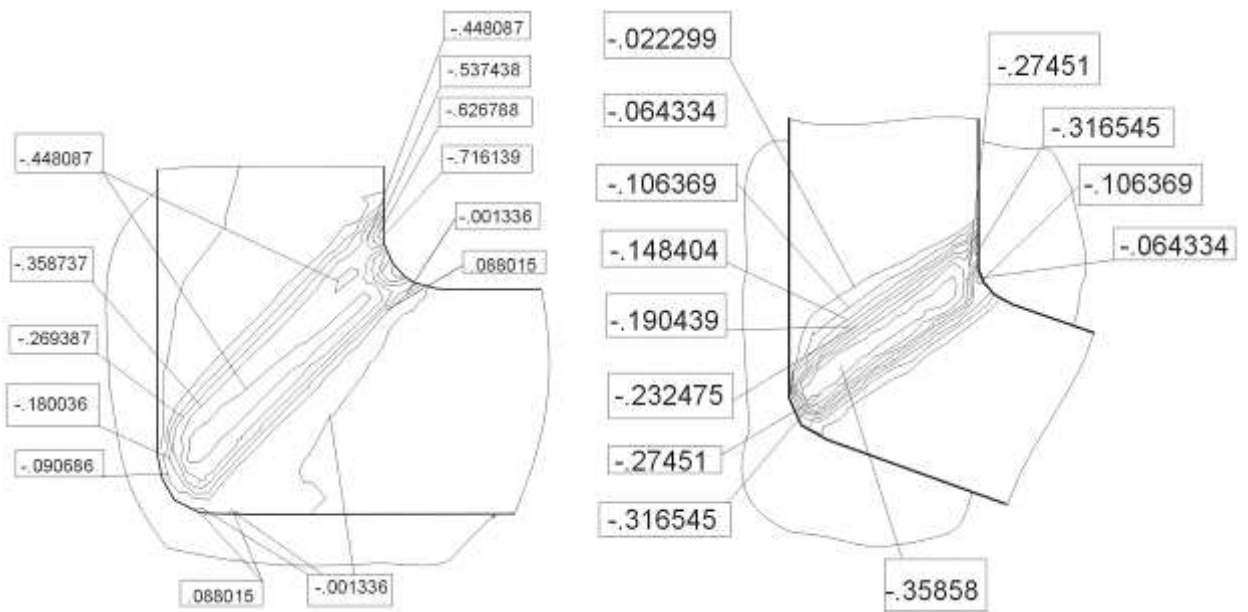


Рис. 1.48. Интенсивность пластических деформаций по оси Y

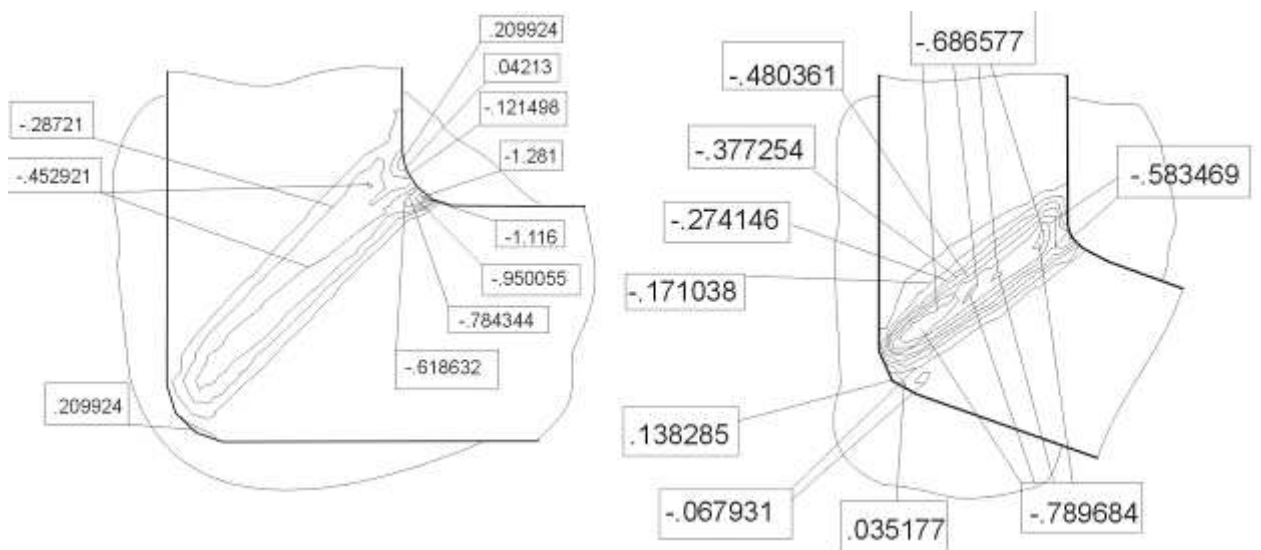


Рис. 1.49. Интенсивность пластических деформации в плоскости XY

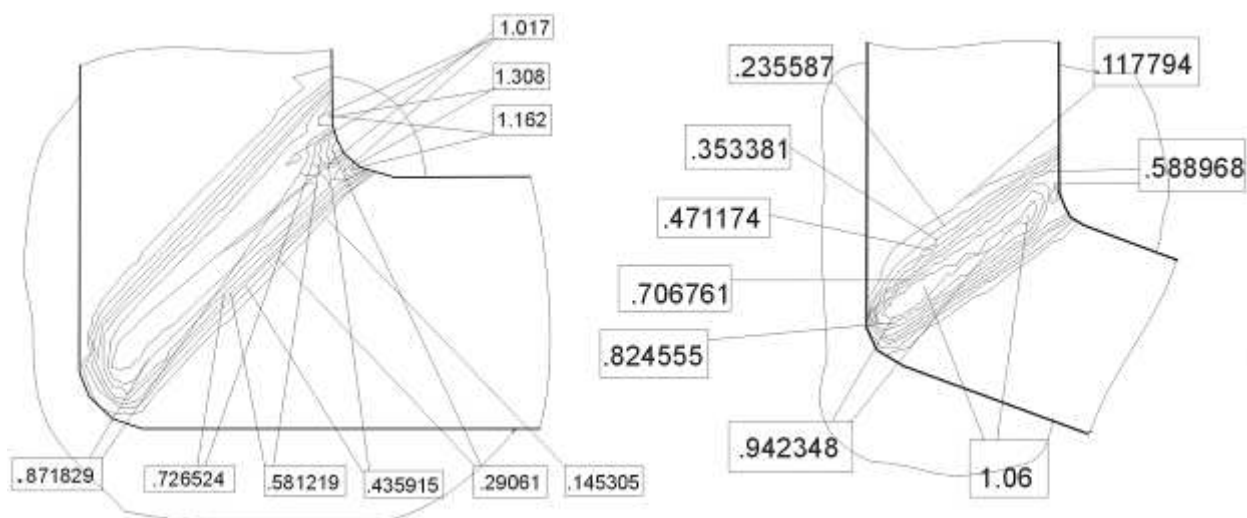


Рис. 1.50. Суммарная интенсивность пластических деформаций

Перемещения по оси X (рис. 1.41) при $2\Phi=90^\circ$ достигают максимального значения 0,004974 м, при $2\Phi=110^\circ$ составили 0,004901 м.

Перемещения по оси Y (рис. 1.42) при $2\Phi=90^\circ$ достигают максимального значения -0,0051 м, при $2\Phi=110^\circ$ составили -0,00513 м.

Суммарные перемещения (рис. 1.43) при $2\Phi=90^\circ$ достигают максимального значения 0,0053 м, при этом видна большая неравномерность перемещений, при $2\Phi=110^\circ$ составили 0,00487 м.

Максимальное значение напряжений по оси X (рис. 1.44) при $2\Phi=90^\circ$ достигают максимального значения -512 МПа в зоне А и -175 МПа в зоне В, при $2\Phi=110^\circ$ достигают максимального значения -668 МПа в зоне А и 353 МПа в зоне В.

Напряжения по оси Y (рис. 1.45) при $2\Phi=90^\circ$ достигают значения -561 МПа, также в зоне А присутствует участок с напряжением сжатия 244 МПа, при $2\Phi=110^\circ$ достигают значения -629 МПа, в зоне А также присутствует участок с напряжением сжатия 156 МПа.

Напряжения в плоскости XY (рис. 1.46) при $2\Phi=90^\circ$ достигают значения в зоне А -97,9 МПа, в данной зоне присутствует участок с противоположным значением напряжений 142 МПа, для зоны В -211 МПа,

при $2\Phi = 110^\circ$ напряжения достигают значения в зоне А -212 МПа, в зоне А присутствует участок с напряжением сжатия 92 МПа, в зоне В -180 МПа.

Интенсивность пластических деформаций по оси Х (рис. 1.47); при $2\Phi = 90^\circ$ составляет 0,44, при $2\Phi = 110^\circ$ составляет 0,32. В случае РКУП при $2\Phi = 90^\circ$ в зоне А образуются сжимающие напряжения с интенсивностью - 0,81.

Интенсивность пластические деформации по оси Y (рис. 1.48); при $2\Phi = 90^\circ$ составляет -0,72 а в наружном углу растягивающие напряжения с интенсивностью 0,088, при $2\Phi = 110^\circ$ составляет -0,36 в данном случае присутствуют лишь сжимающие напряжения.

Интенсивность пластических деформации в плоскости XY (рис. 1.49); при $2\Phi = 90^\circ$ составляет 0,21, для растягивающих напряжений в наружном углу (зона А) и - 0,9 для сжимающих в зоне В, при $2\Phi = 110^\circ$ составляет 0,14 для растягивающих напряжений в зоне А и -0,79 для сжимающих в зоне В.

Суммарная интенсивность пластических деформаций (рис. 1.50) для угла $2\Phi = 90^\circ$ составляет 1,308; для угла $2\Phi = 110^\circ$ – 1,06.

Приведенные выше описания результаты МКЭ-моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Картины перемещений показывают, что в зоне В происходит снижение значений перемещений (при $2\Phi = 90^\circ$ до 0,003 и $2\Phi = 110^\circ$ до 0,0043), что свидетельствует о сжатие в данной зоне, соответственно в зоне А происходит растяжение.
2. При $2\Phi = 110^\circ$ перемещения распределены более равномерно между зонами А и В.
3. Под действием напряжений возникающих в заготовке происходят пластические деформации.
4. Распределение напряжений по оси между зонами А и В при $2\Phi = 90^\circ$ и 110° неравномерно, также в зоне А присутствуют очаги с напряжениями имеющими противоположный знак (при $2\Phi = 110^\circ$ эти напряжения имеют

меньшее значение), что может свидетельствовать о неравномерности возникающих деформаций и возможном течении металла в направлении противоположном основному перемещению.

5. Распределение интенсивности пластических деформаций показывает, что с увеличением угла пересечения каналов матрицы интенсивность пластических деформаций уменьшается.
6. При $2\Phi = 90^\circ$ наблюдается смещение в направлении внутреннего угла матрицы, что может приводить к появлению застойной зоны в наружном углу матрицы. Проблема образования застойной зоны хорошо известна из теории и практики выдавливания материалов [9]. Такая зона во внешнем углу канала образуется и при компьютерном моделировании РКУП некоторых материалов в условиях сильного трения [10]. Кроме того, материал в области застойной зоны может отделиться от образца (рис. 1.51).



Рис. 1.51. Образование застойной зоны при РКУП

Полученные результаты соотносятся с имеющимися данными других исследователей о закономерностях пластического течения при РКУП.

Результаты распределения компонент тензоров напряжений и деформаций не позволяют в явном виде получить закономерности накопления свойств в материале в процессе обработки. Для этого необходимо произвести расчет показателей напряженно-деформированного состояния вдоль линий тока в очаге деформации.

Методика определения координат точек линий тока, пересчета параметров напряженно-деформированного состояния из узловых точек конечно-элементной модели в точки линий тока и расчета параметров механического состояния в точках линий тока представлена в разделе 1.1 настоящего отчета.

Полученные результаты показаны на рис. 1.52 – 1.83. Цифрами обозначены линии тока.

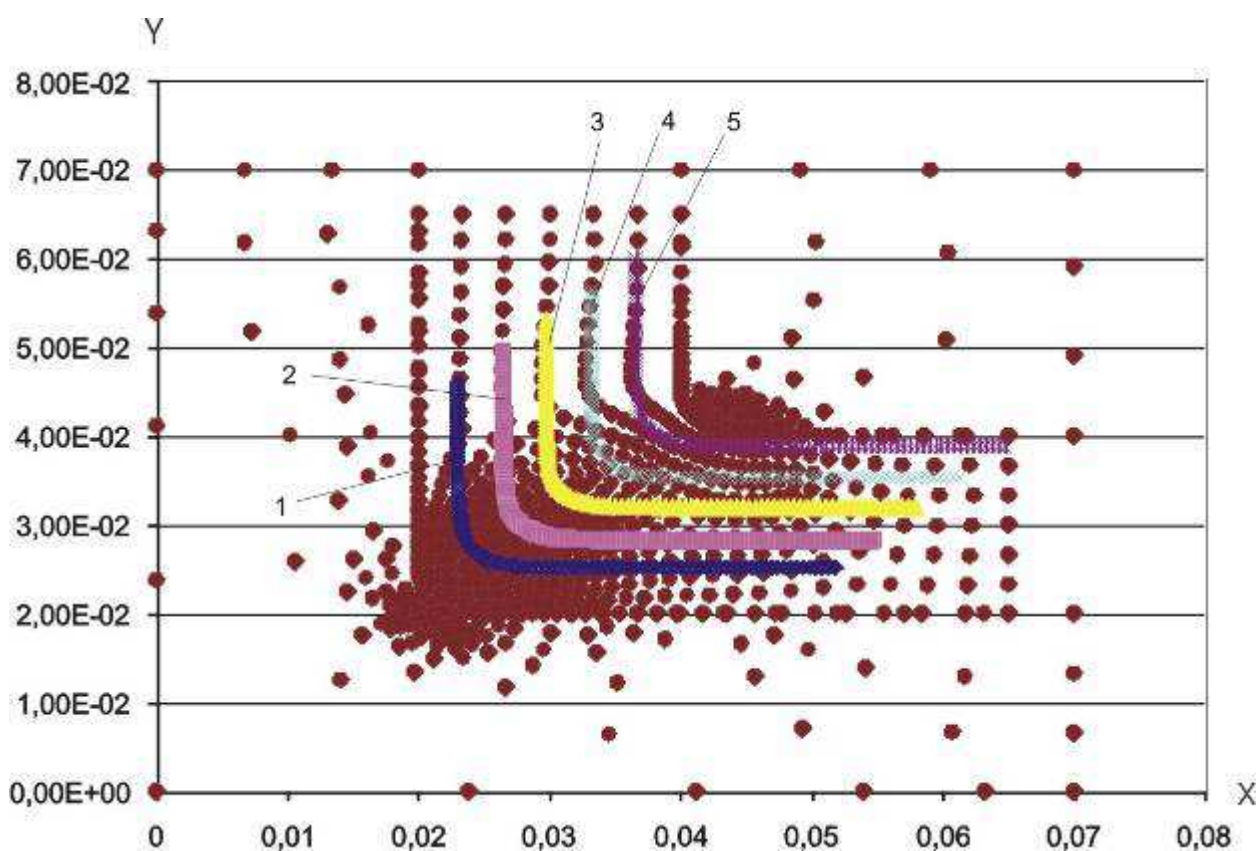


Рис. 1.52. Координаты узлов и линии тока, при $\Phi=90^\circ$

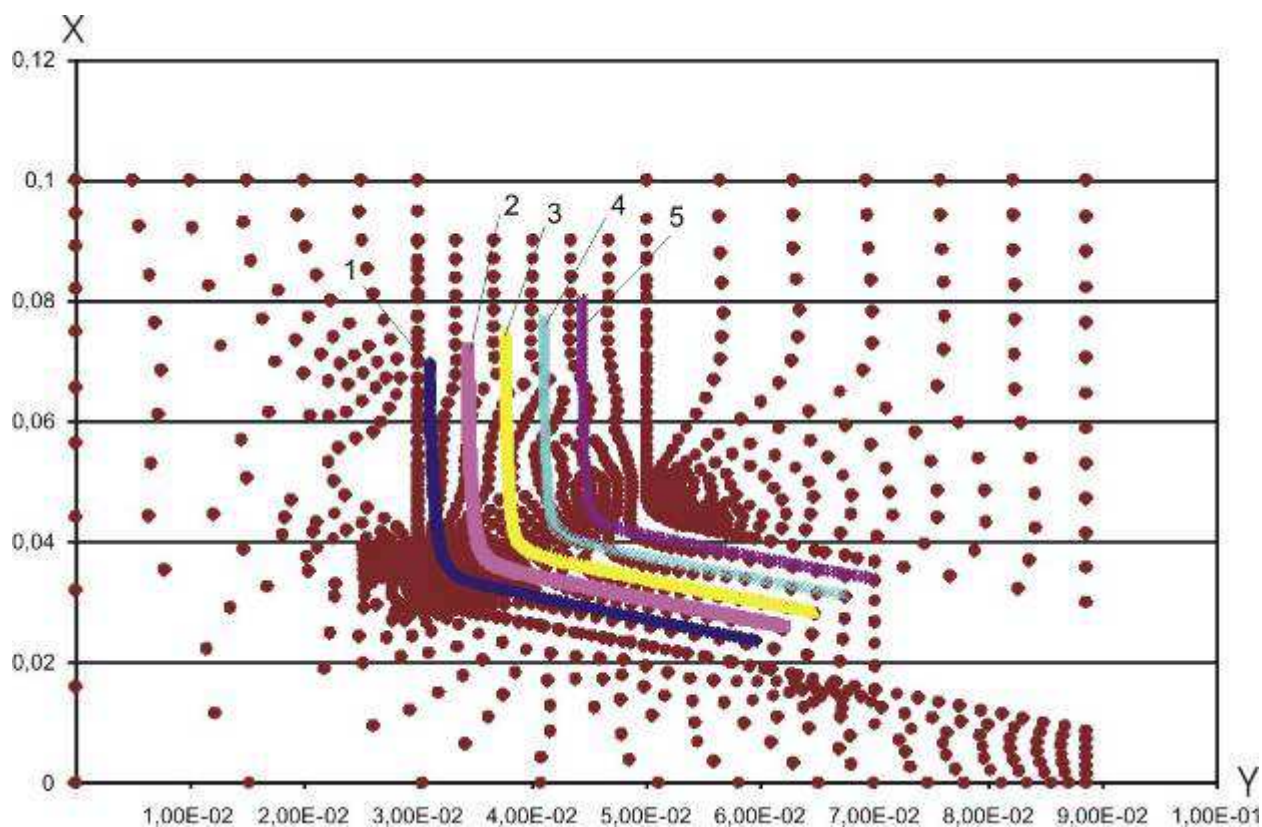


Рис. 1.53. Координаты узлов и линии тока, при $\Phi=110^\circ$

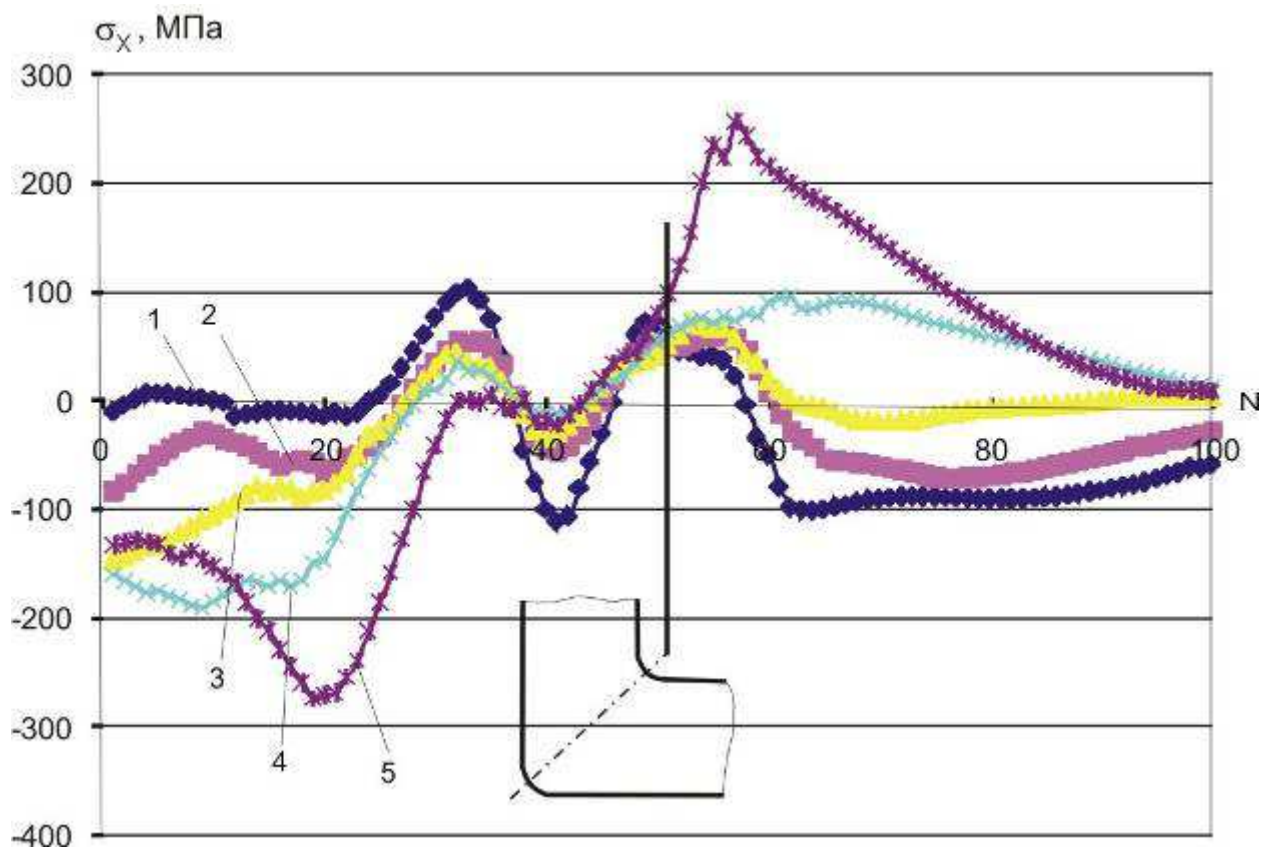


Рис. 1.54. Напряжения по оси X, при $\Phi=90^\circ$

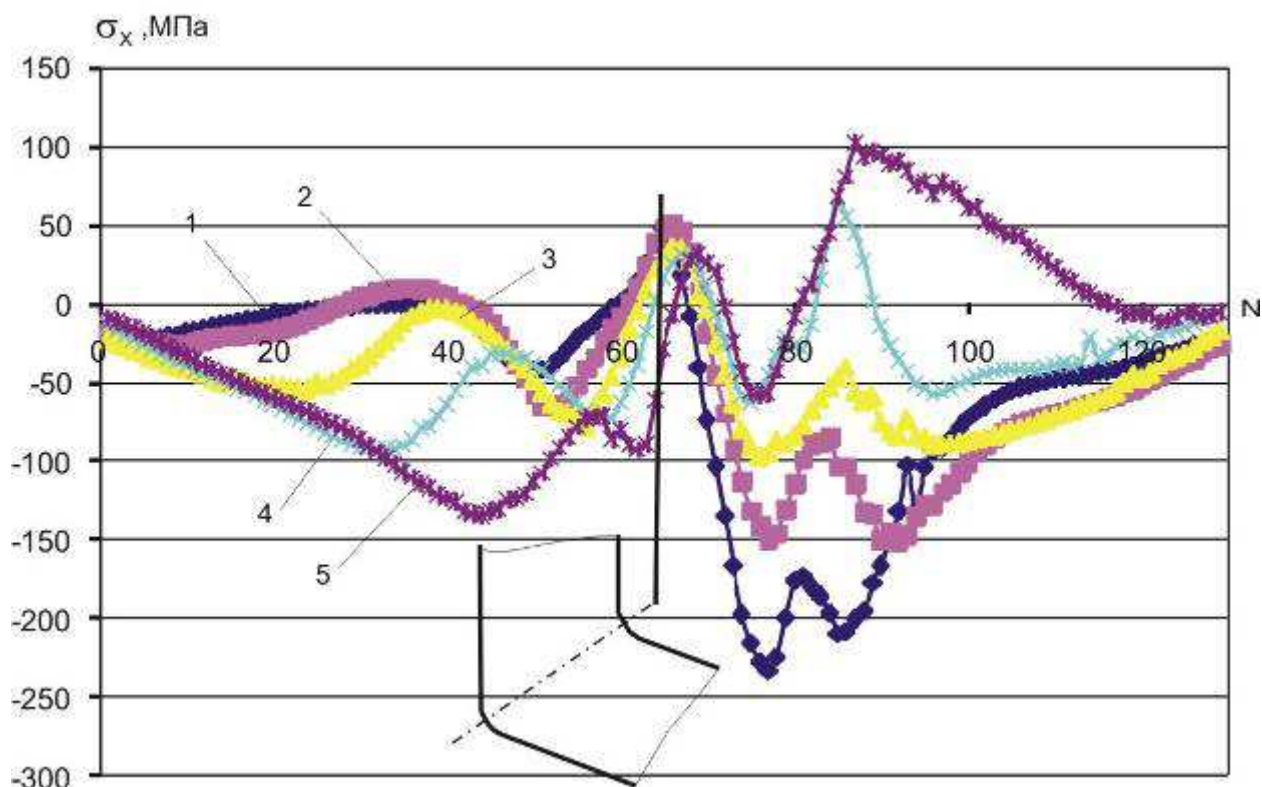


Рис. 1.55. Напряжения по оси X, при $\Phi=110^\circ$

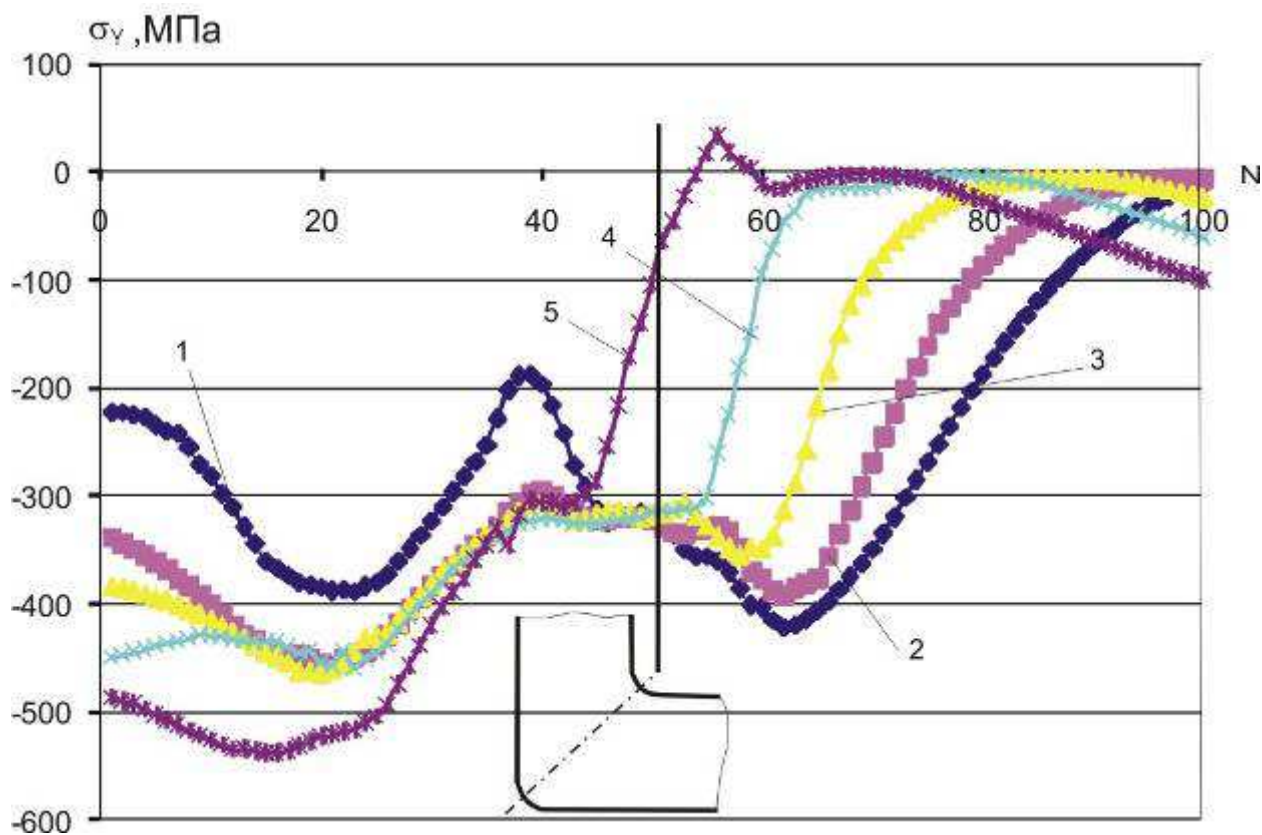


Рис. 1.56. Напряжения по оси Y, при $\Phi=90^\circ$

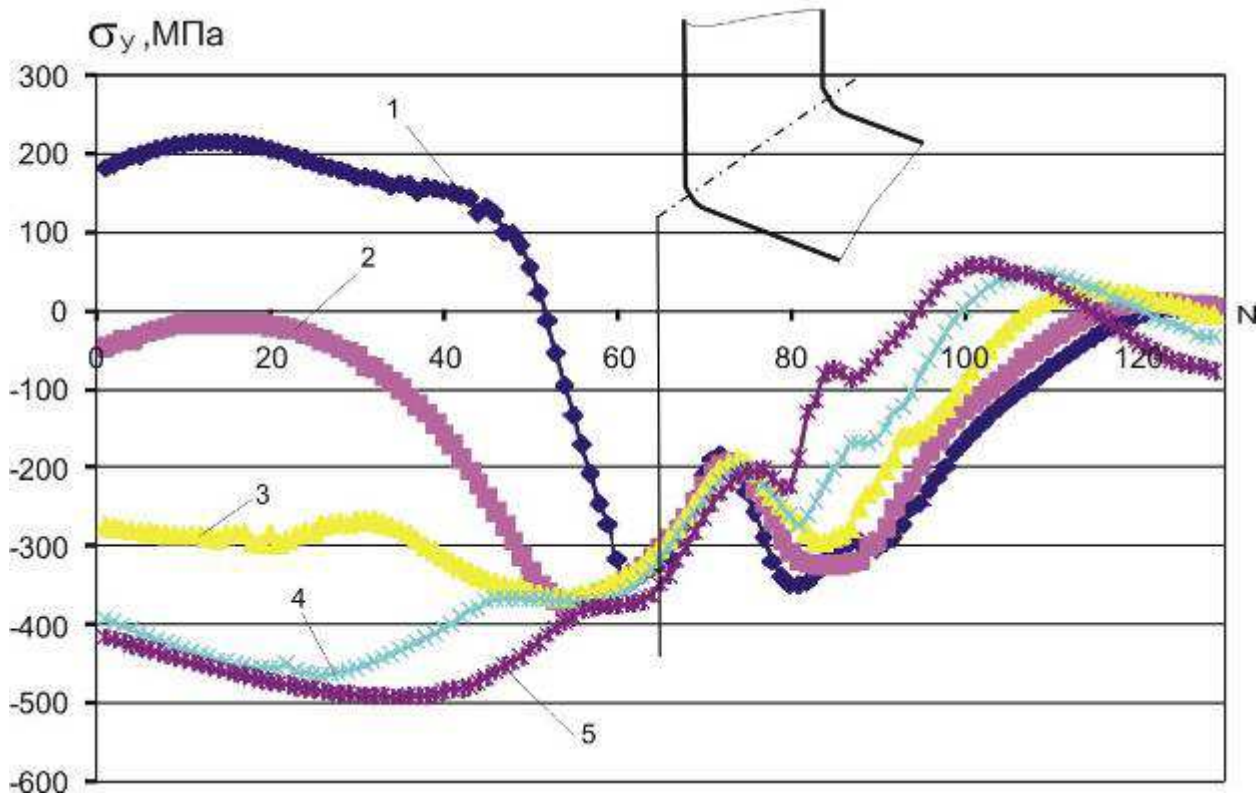


Рис. 1.57. Напряжения по оси Y , при $\Phi=110^\circ$

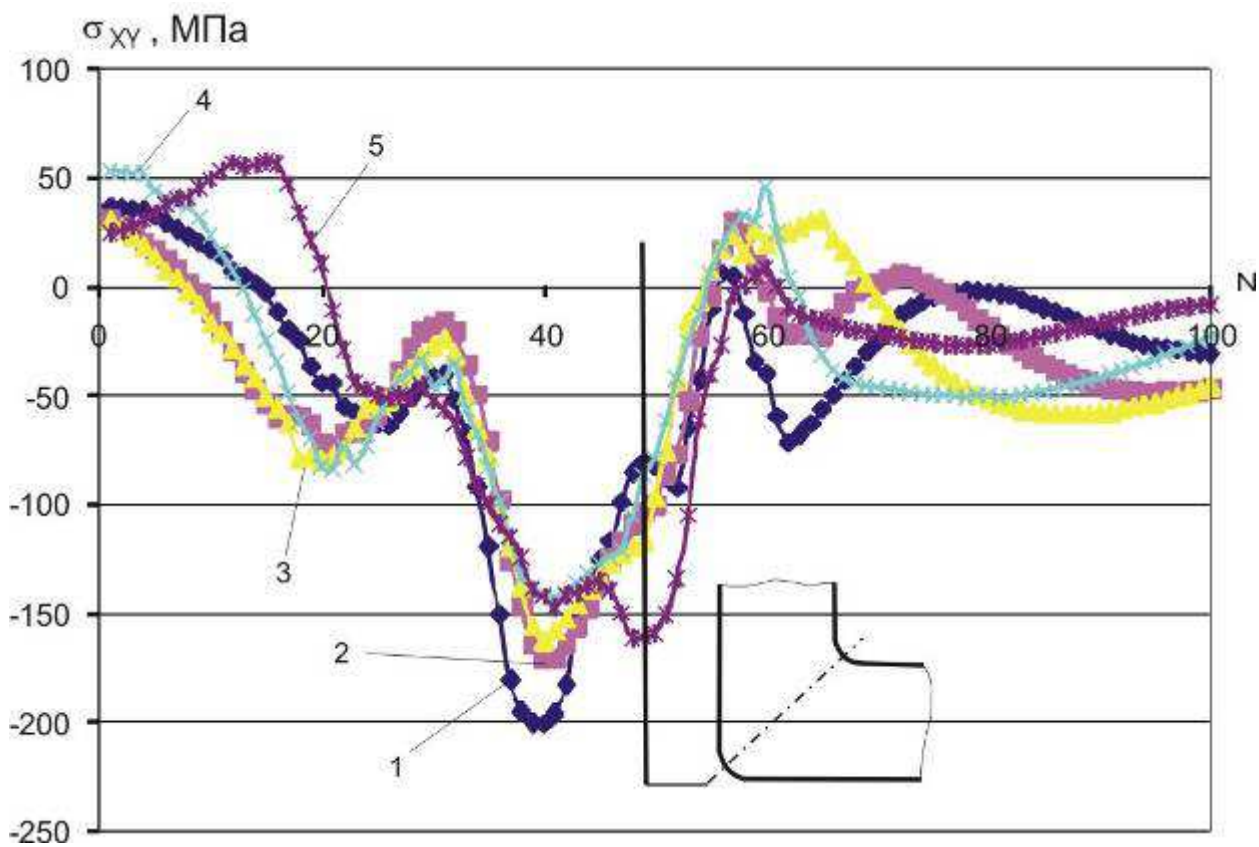


Рис. 1.58. Напряжения в плоскости XU , при $\Phi=90^\circ$

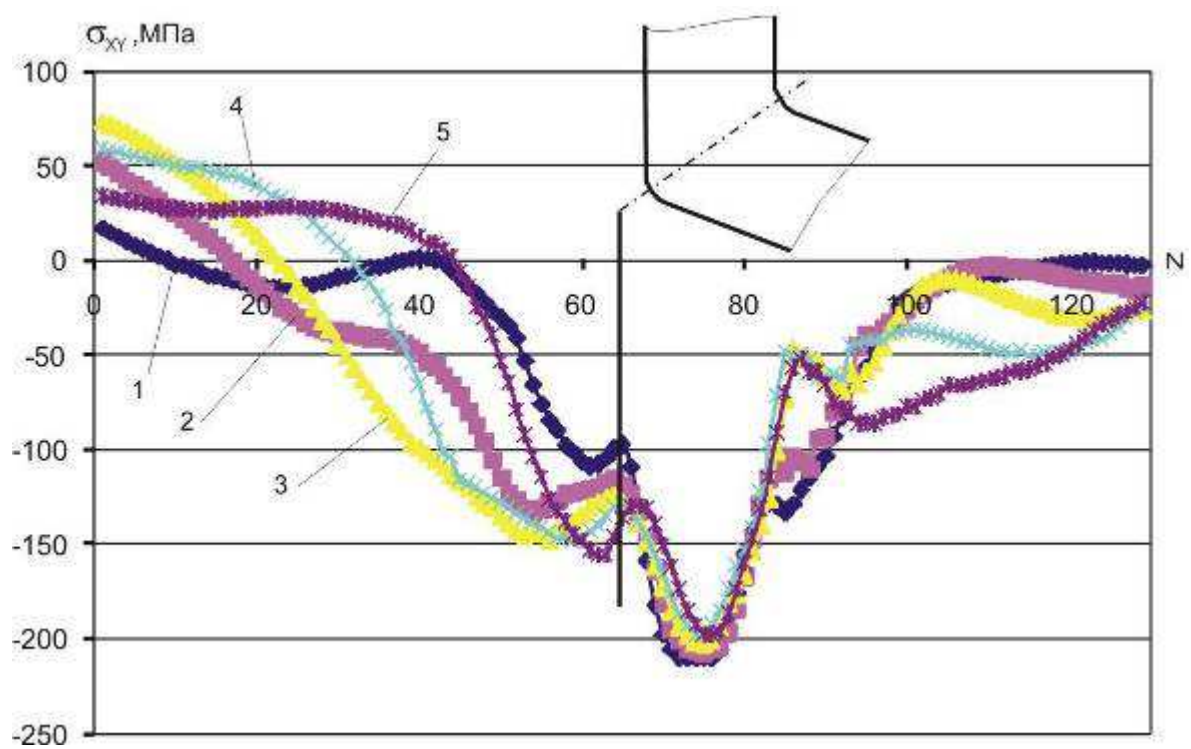


Рис. 1.59. Напряжения в плоскости XY, при $\Phi = 110^\circ$

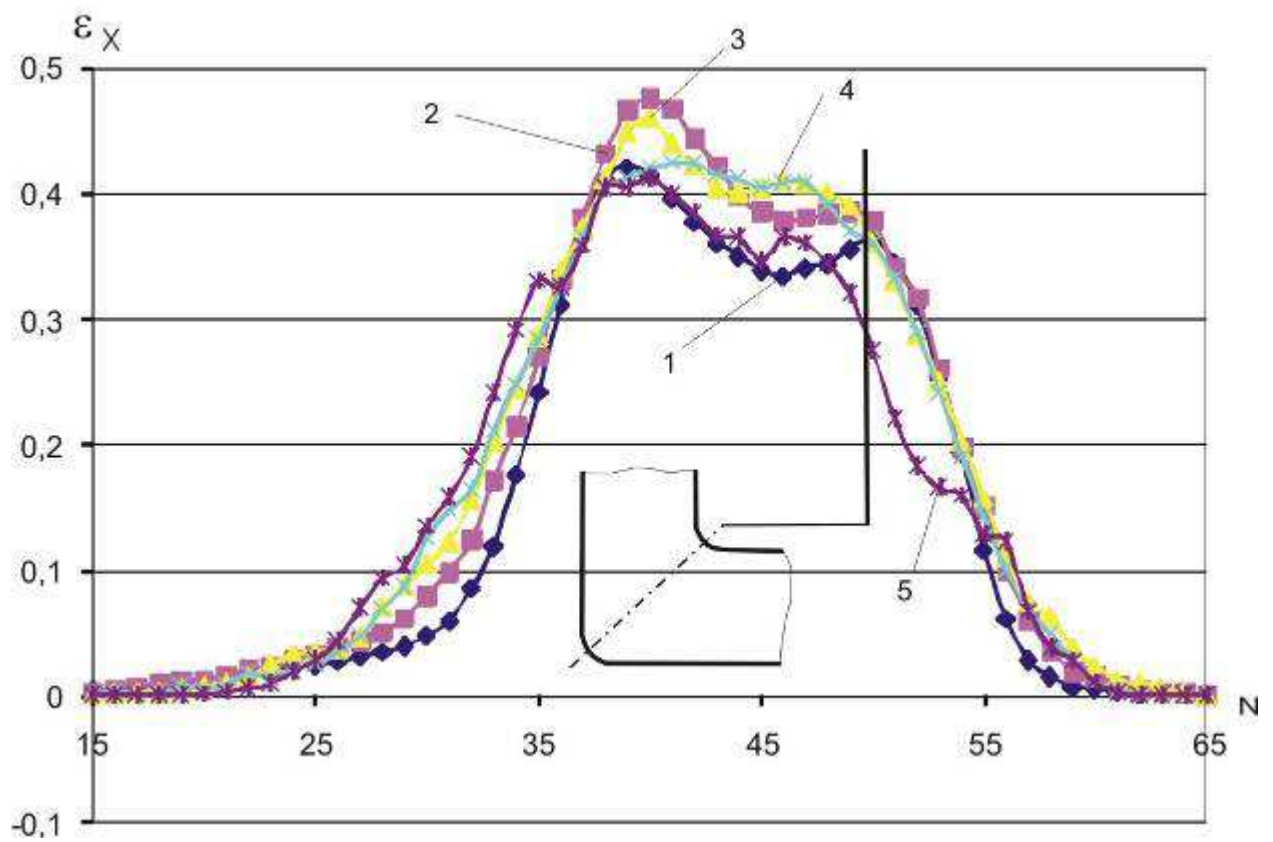


Рис. 1.60. Деформации по оси X, при $\Phi = 90^\circ$

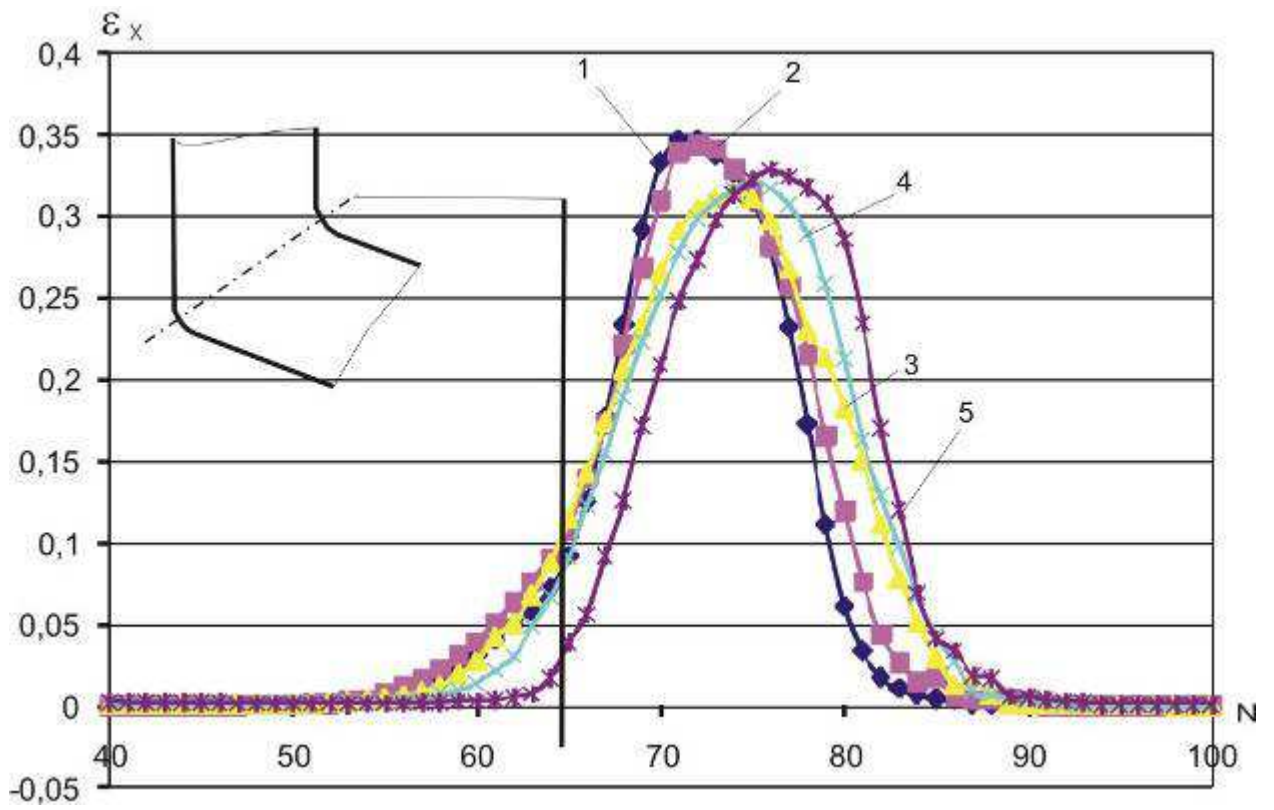


Рис. 1.61. Деформации по оси X, при $\Phi=110^\circ$

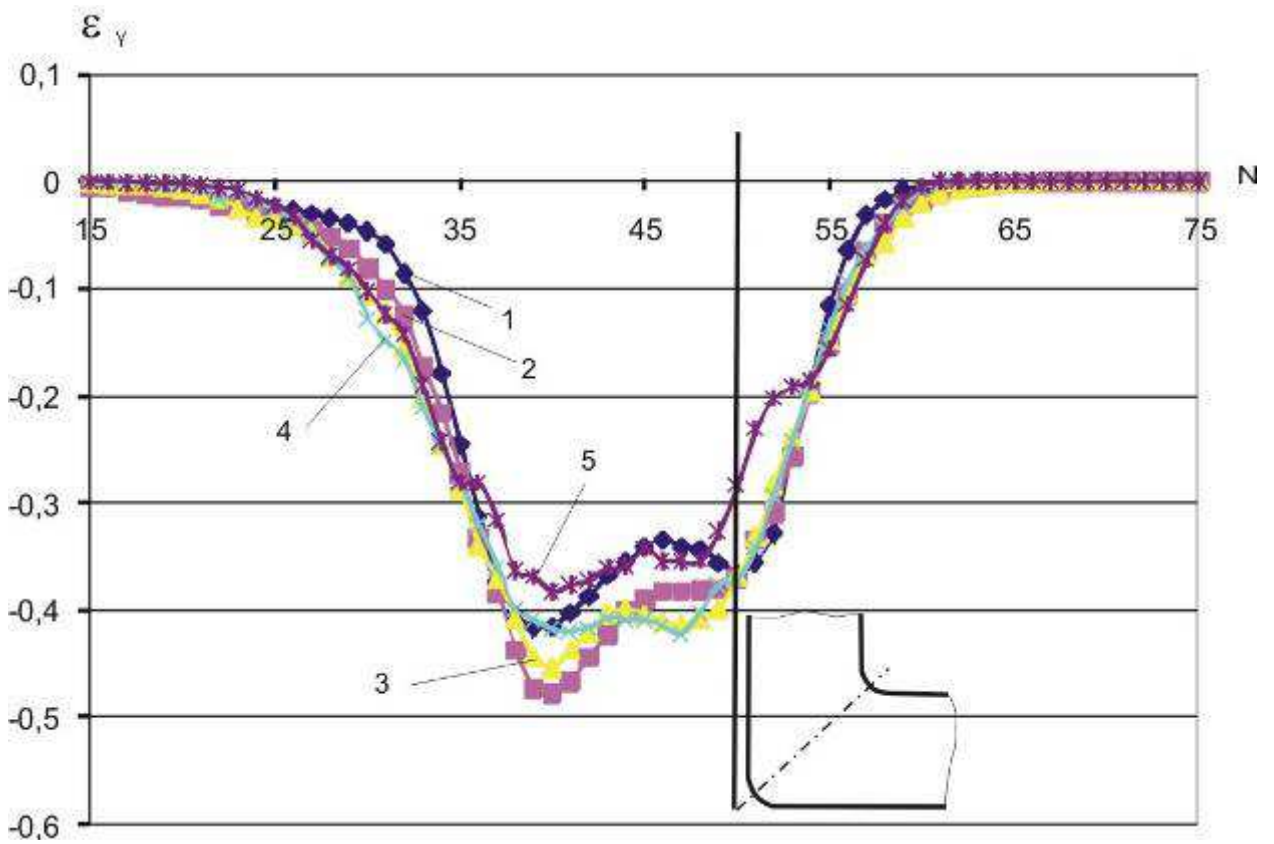


Рис. 1.62. Деформации по оси Y, при $\Phi=90^\circ$

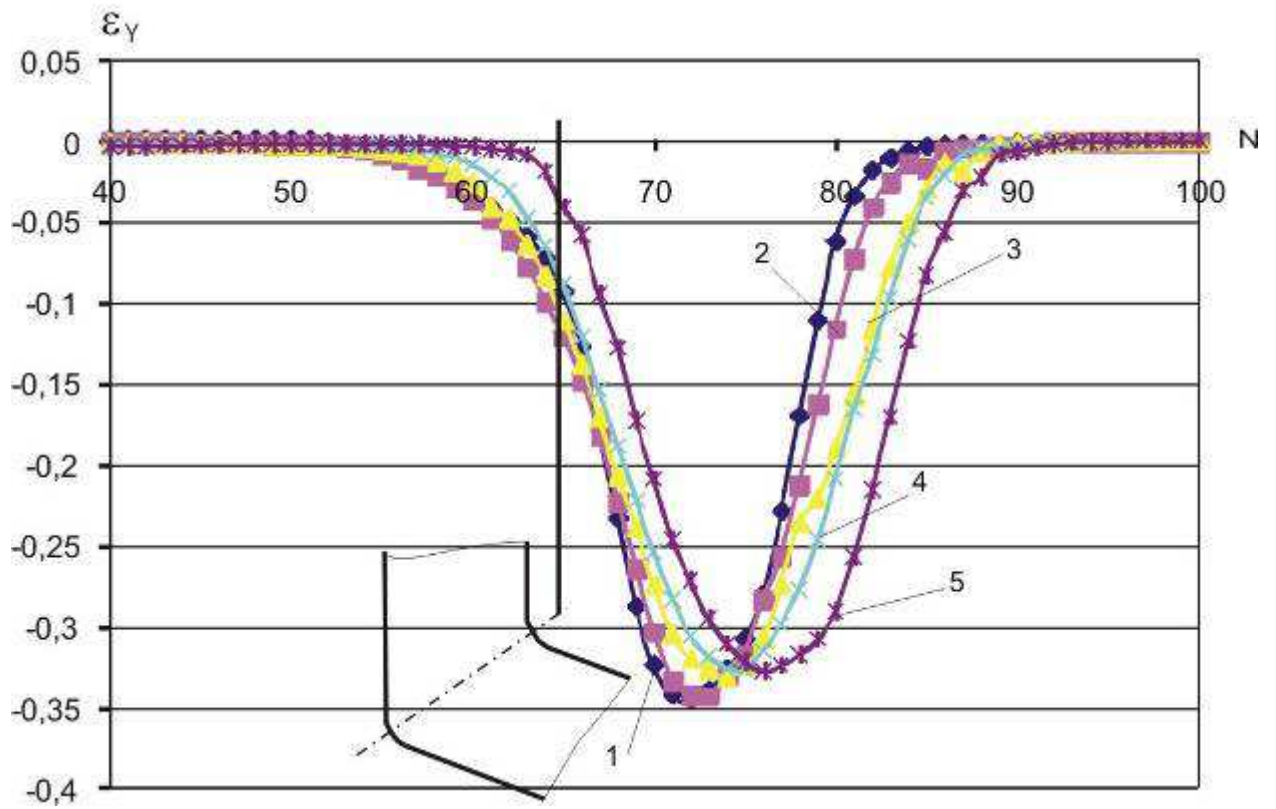


Рис. 1.63. Деформации по оси Y, при $\Phi=110^\circ$

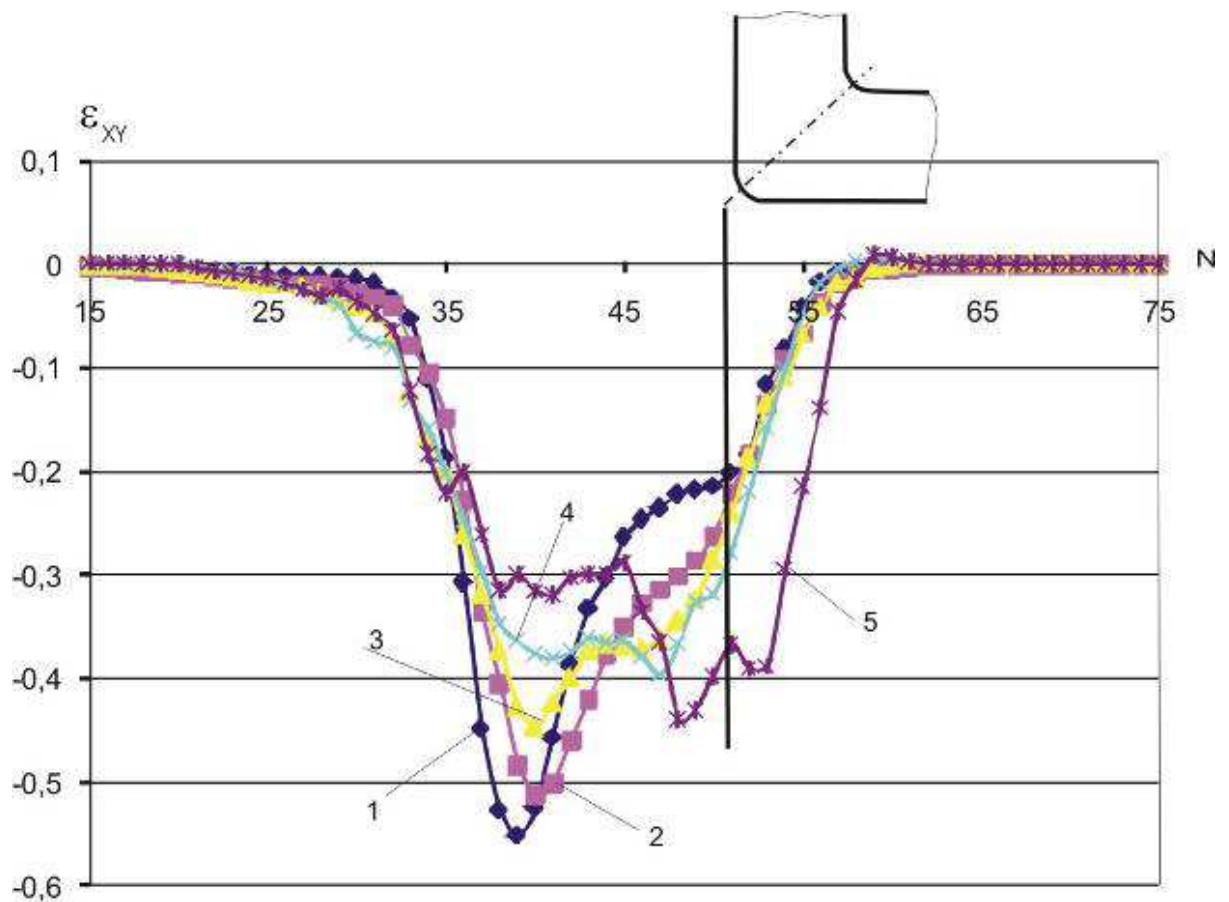


Рис. 1.64. Деформации в плоскости XY, при $\Phi=90^\circ$

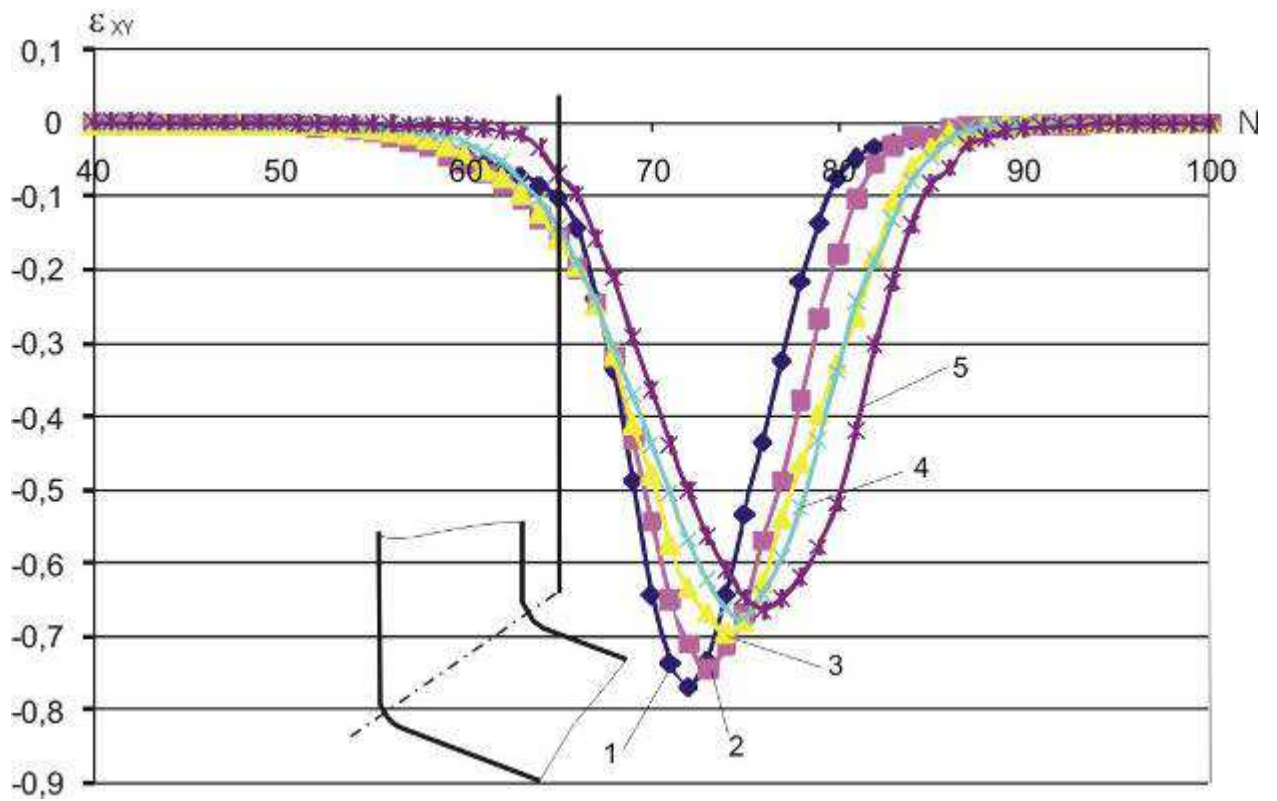


Рис. 1.65. Деформации в плоскости XY, при $\Phi=110^\circ$

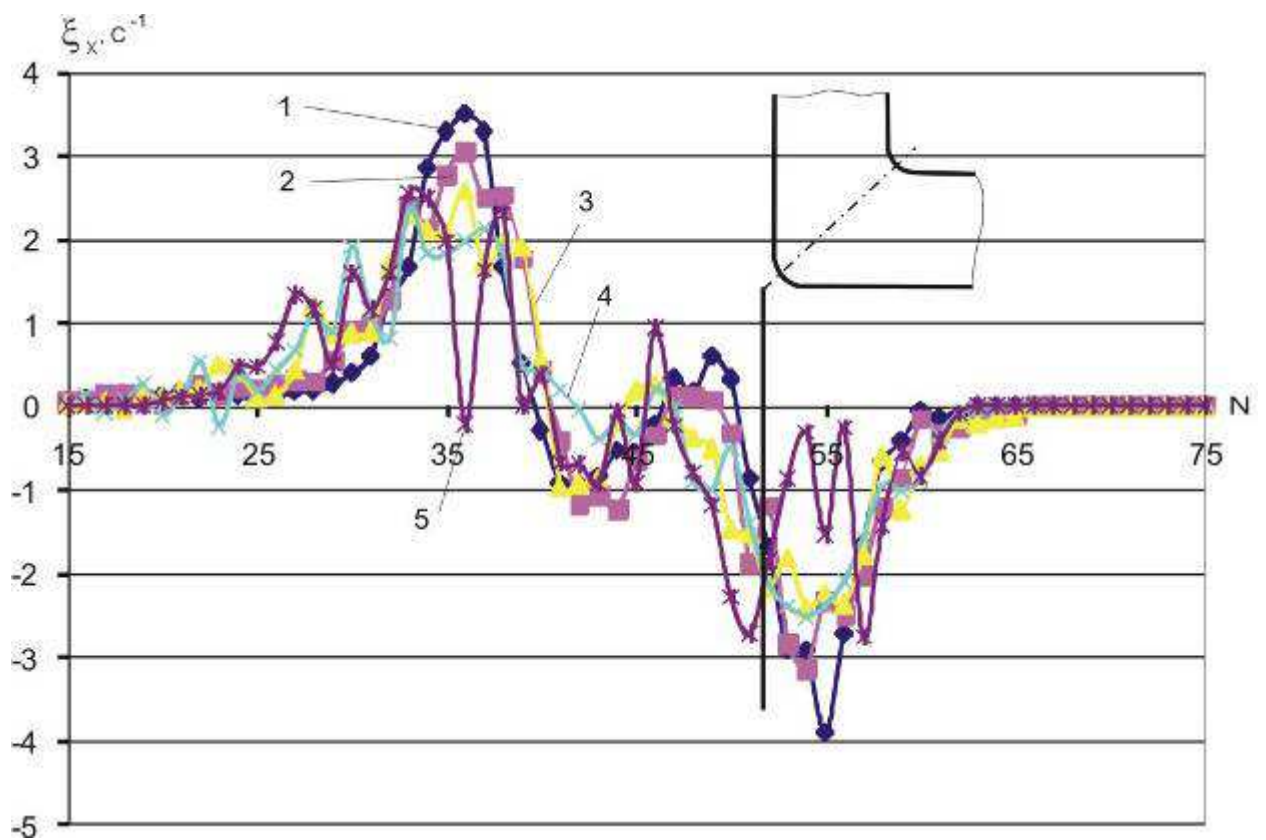


Рис. 1.66. Скорость деформации по оси X, при $\Phi=90^\circ$

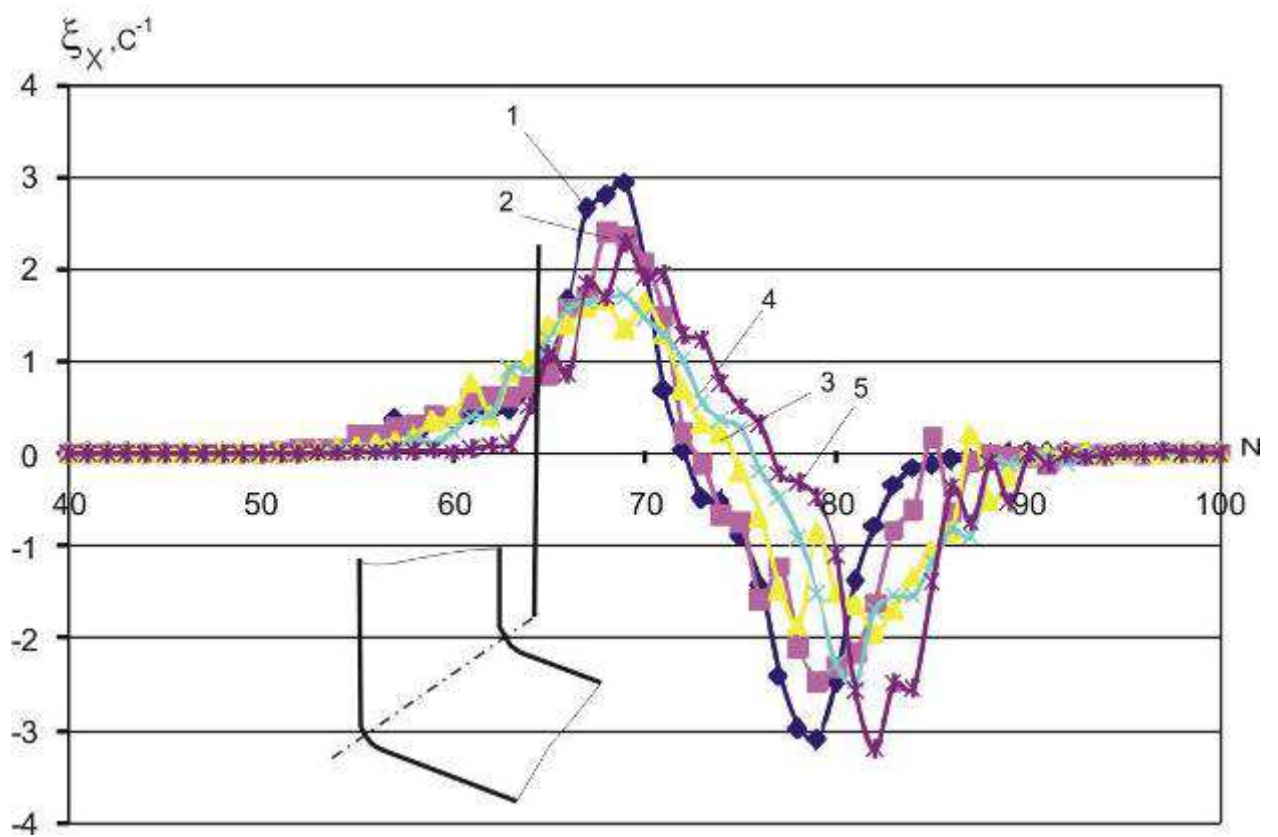


Рис. 1.67. Скорость деформации по оси X, при $\Phi=110^\circ$

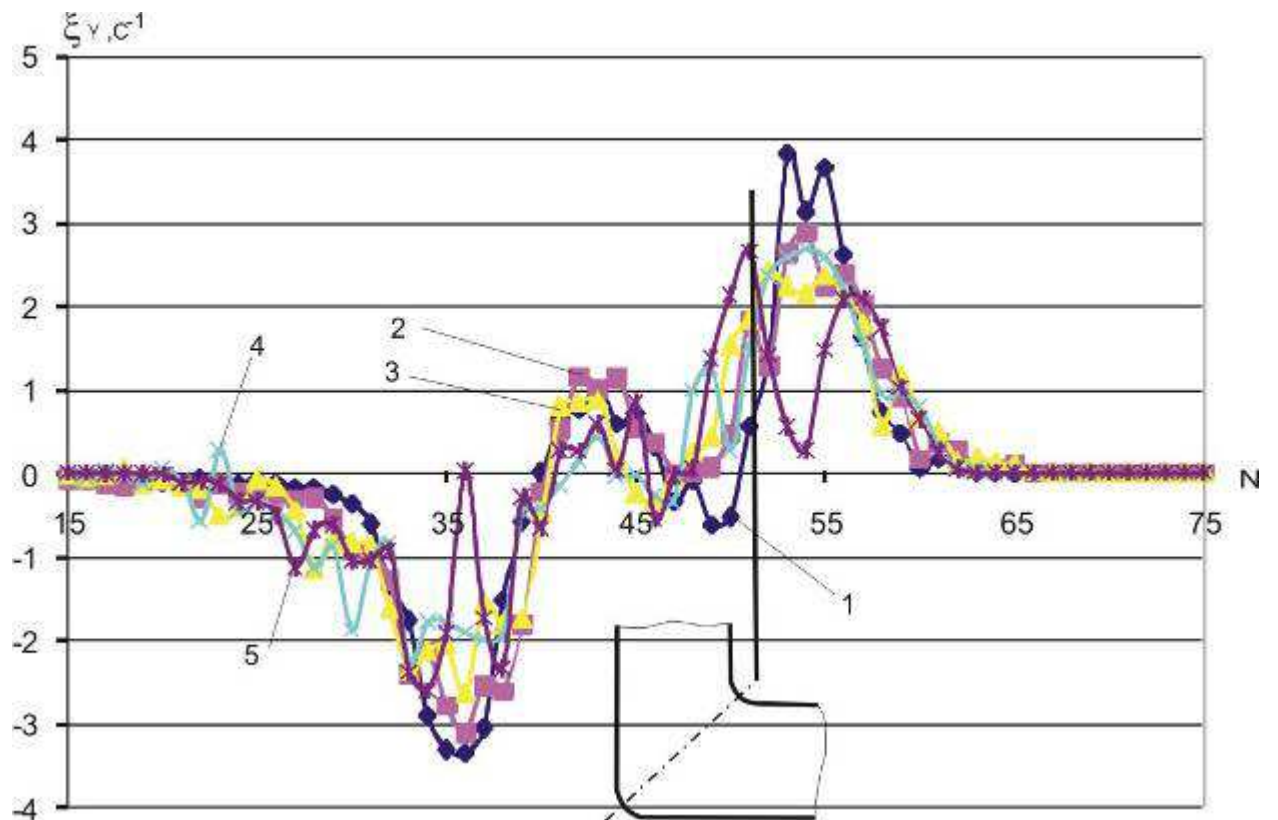


Рис. 1.68. Скорость деформации по оси Y, при $\Phi=90^\circ$

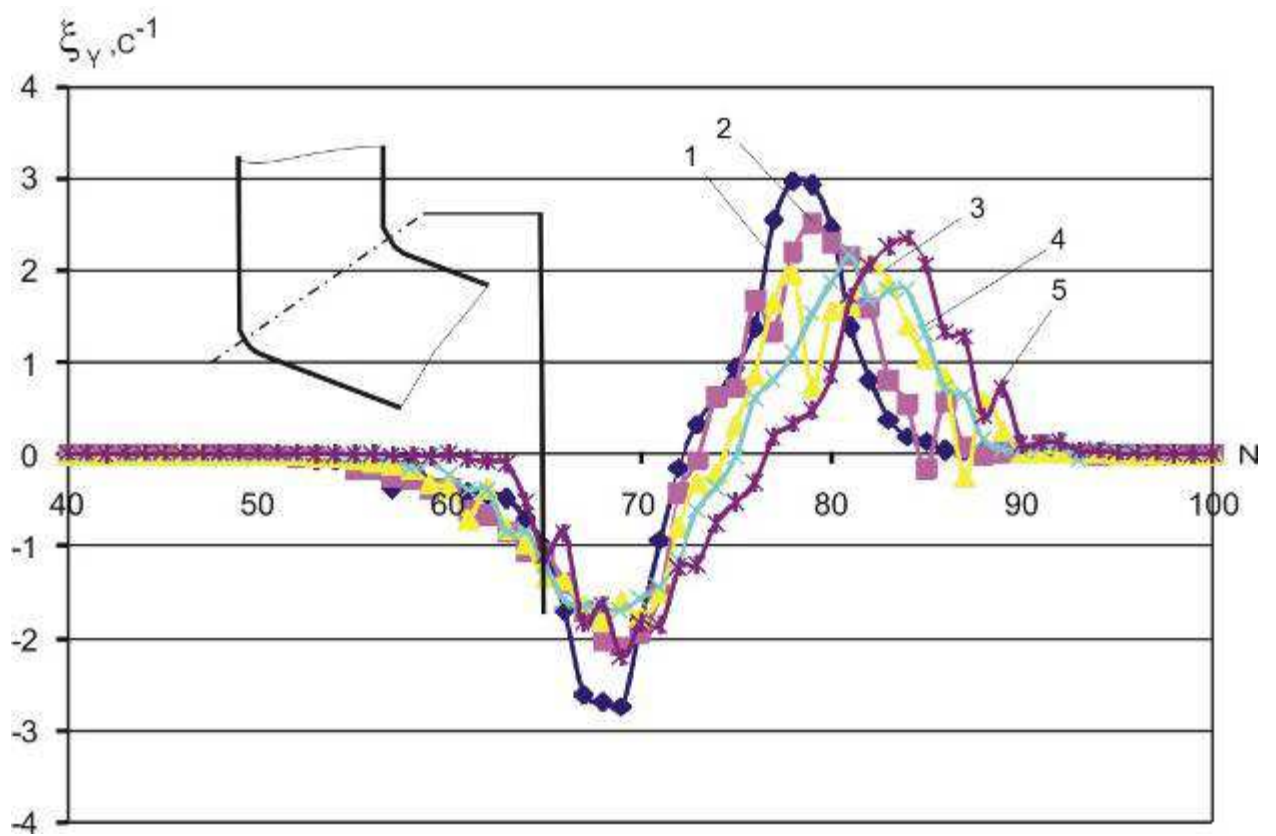


Рис. 1.69. Скорость деформации по оси Y, при $\Phi=110^\circ$

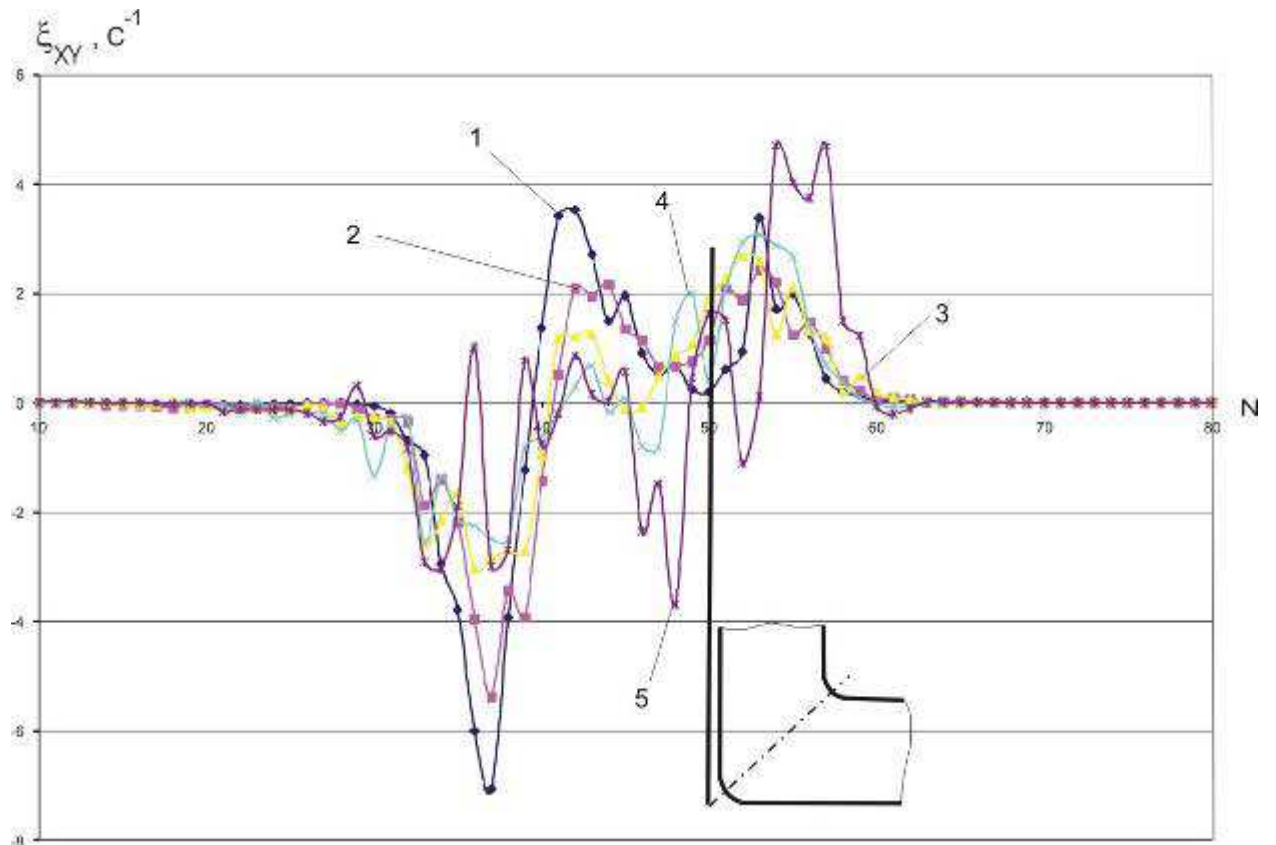


Рис. 1.70. Скорость деформации по оси XY, при $\Phi=90^\circ$

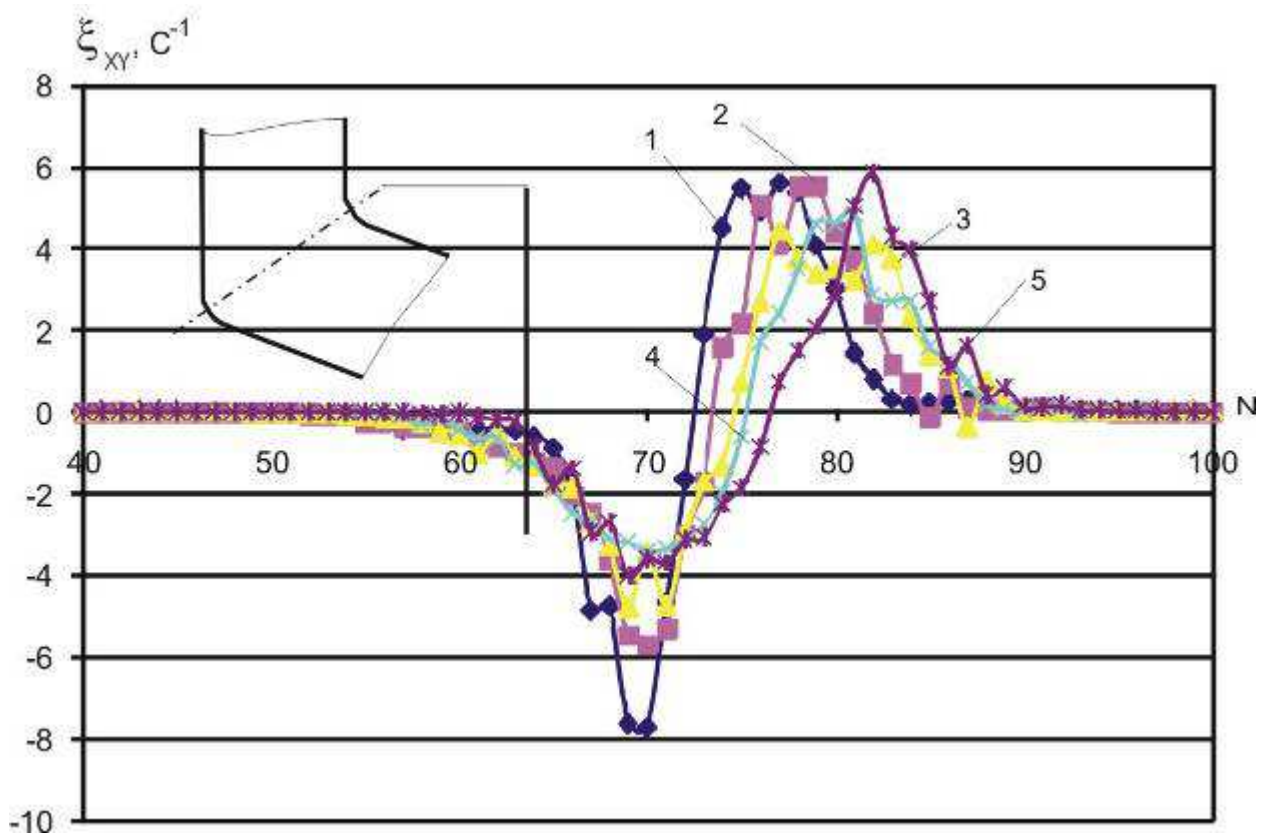


Рис. 1.71. Скорость деформации по оси XY, при $\Phi = 110^\circ$

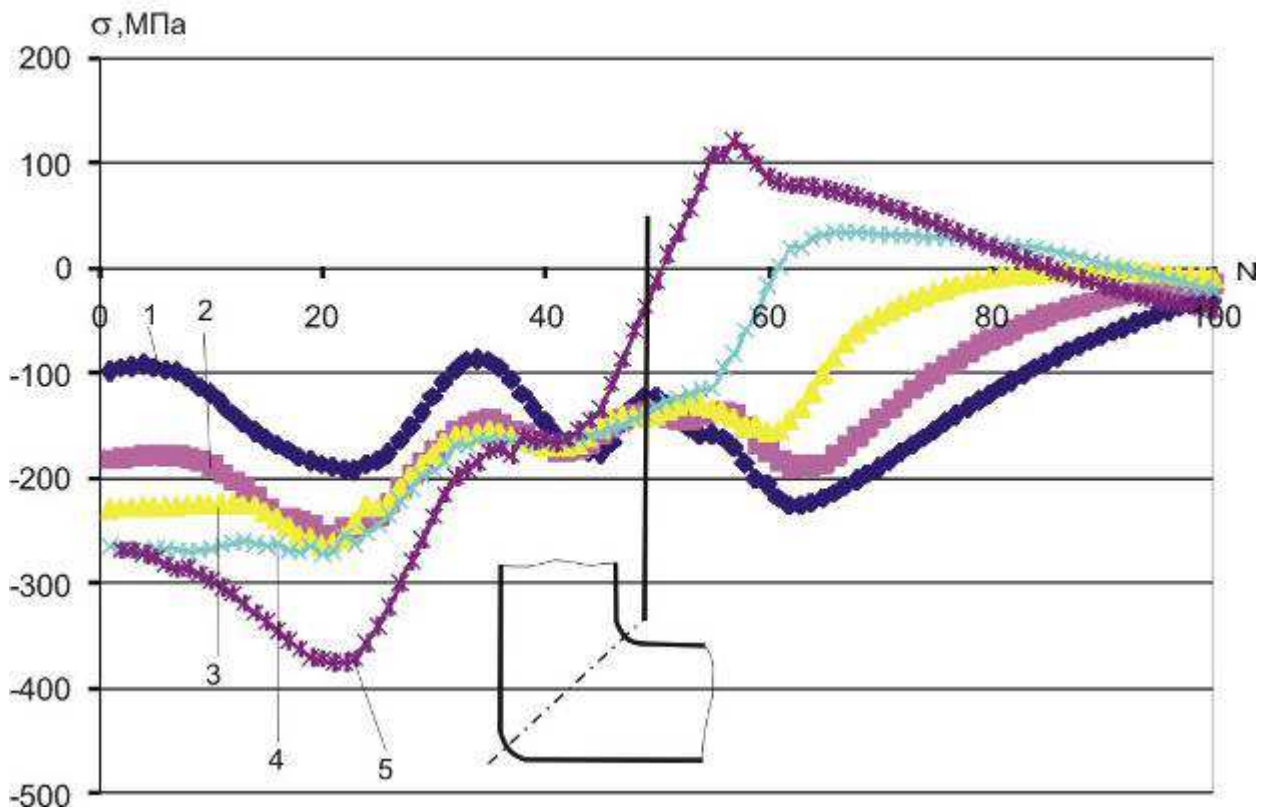


Рис. 1.72. Напряжения, при $\Phi = 90^\circ$

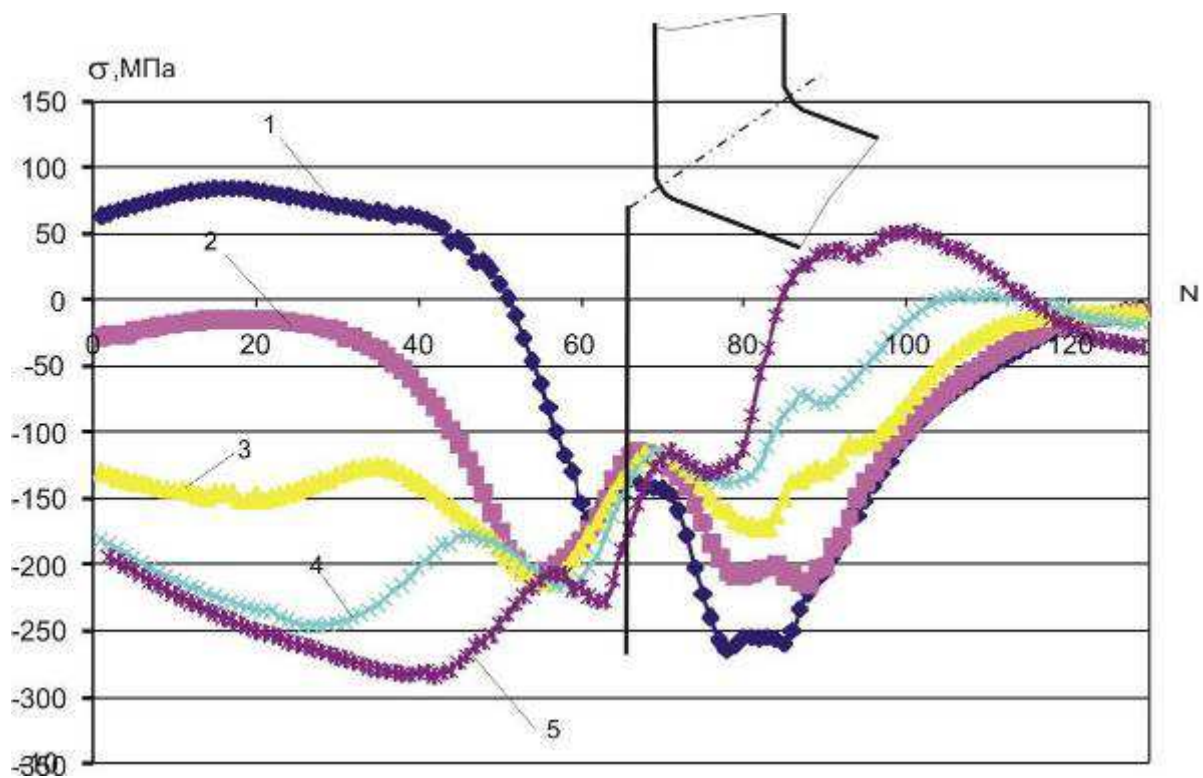


Рис. 1.73. Напряжения, при $\Phi=110^\circ$

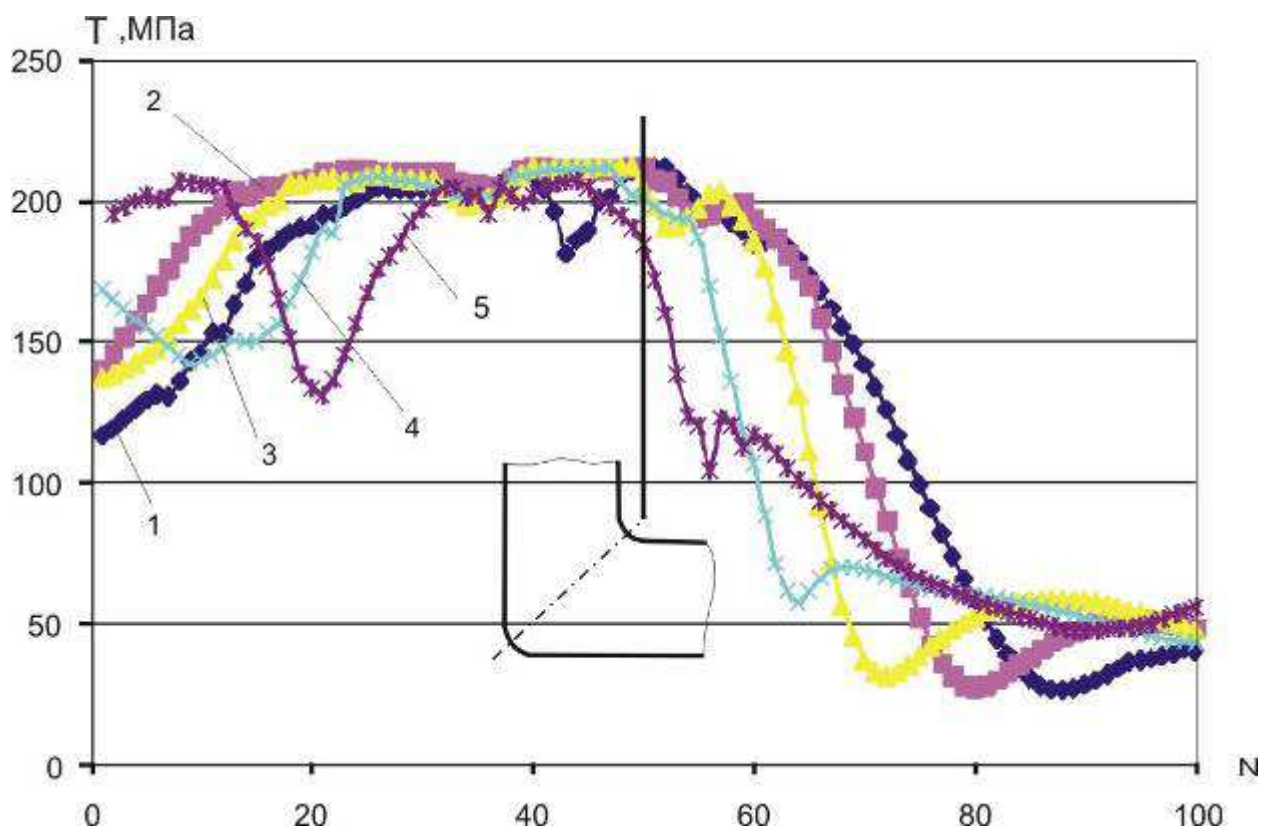


Рис. 1.74. Интенсивность касательных напряжений, при $\Phi=90^\circ$

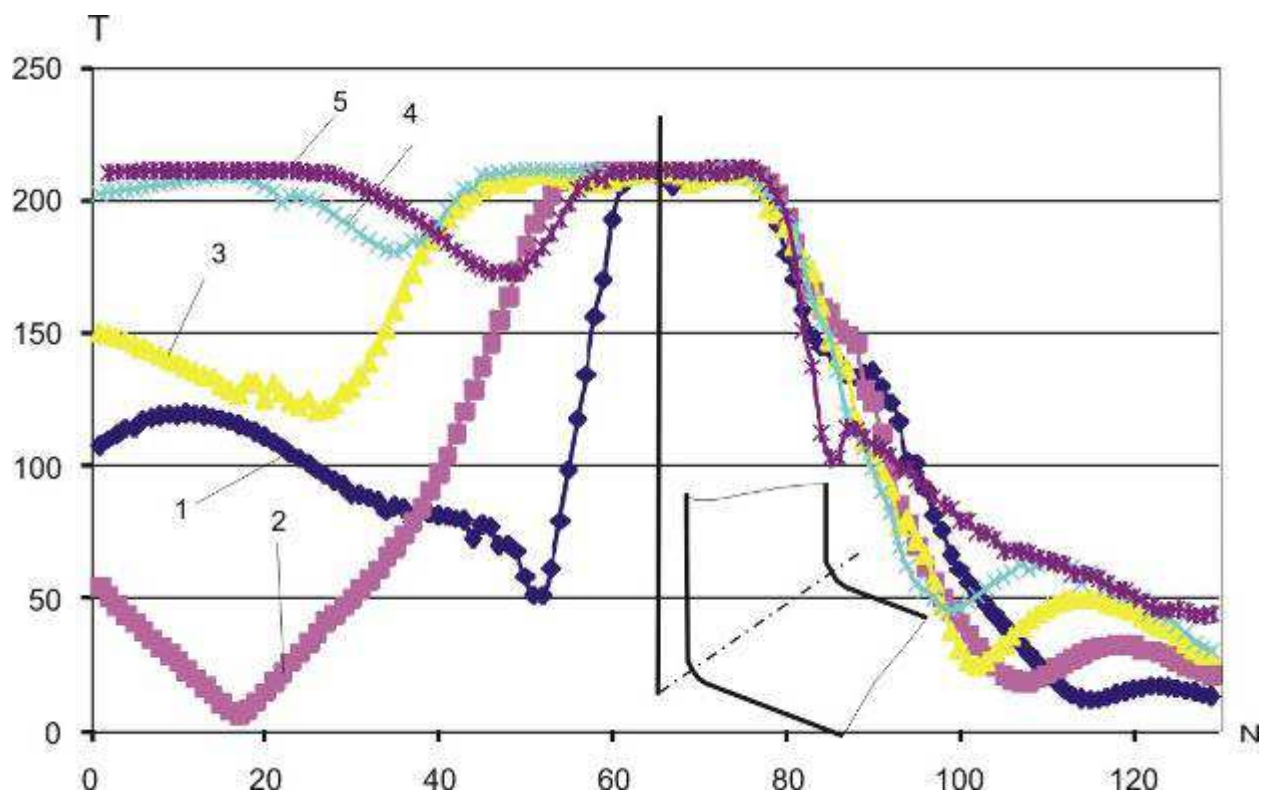


Рис. 1.75. Интенсивность касательных напряжений, при $\Phi=110^\circ$

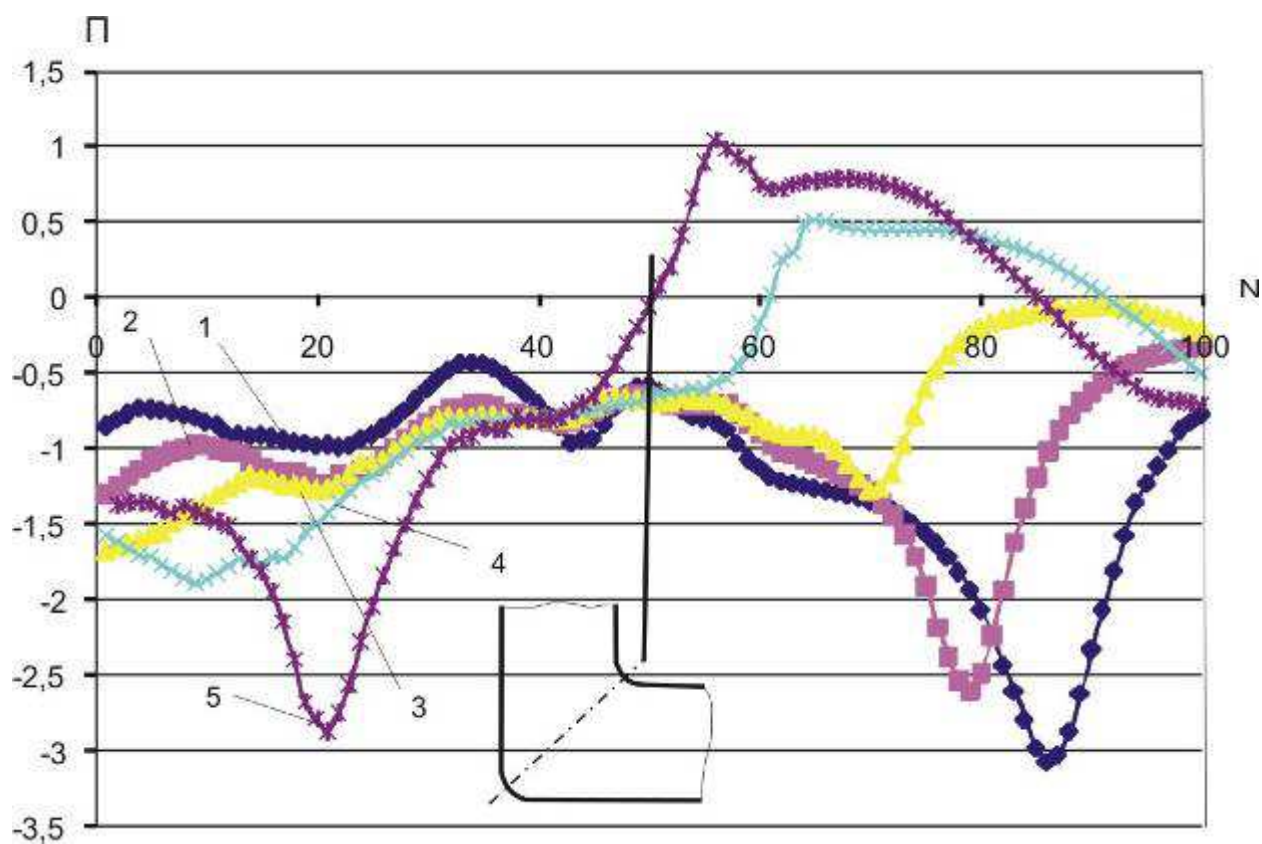


Рис. 1.76. Показатель схемы напряженного состояния, при $\Phi=90^\circ$

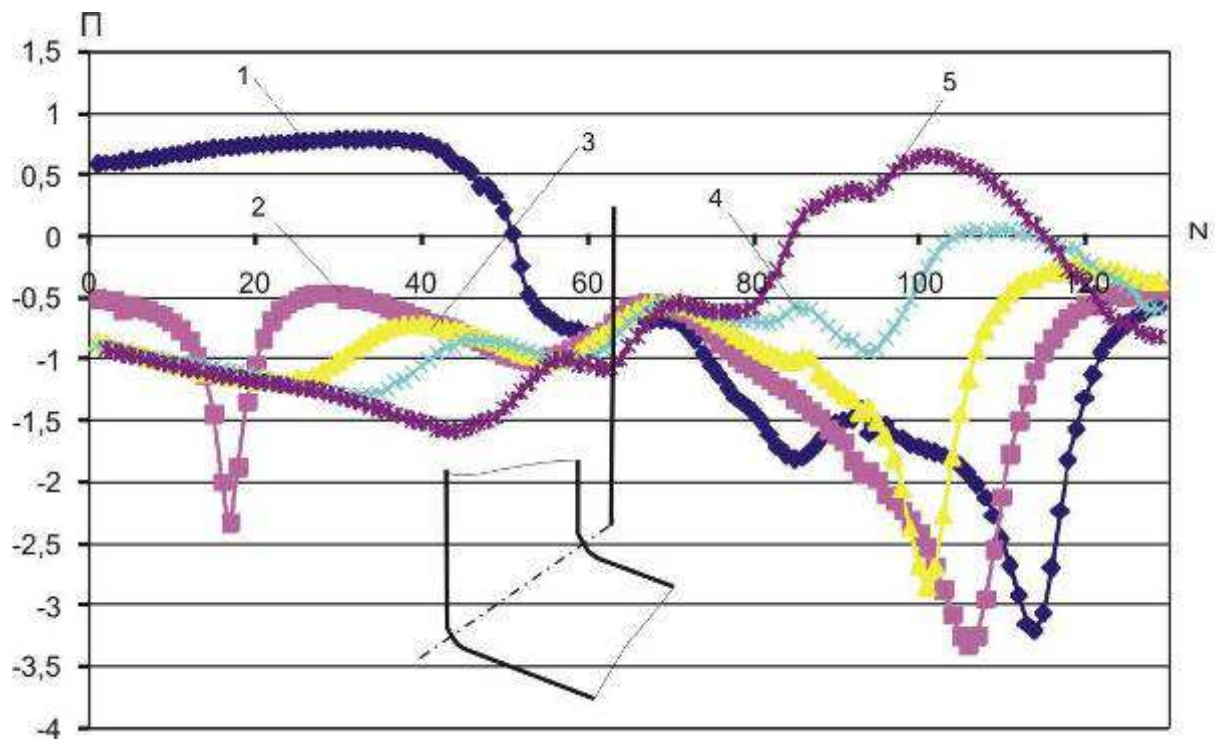


Рис. 1.77. Показатель схемы напряженного состояния, при $\Phi=110^\circ$

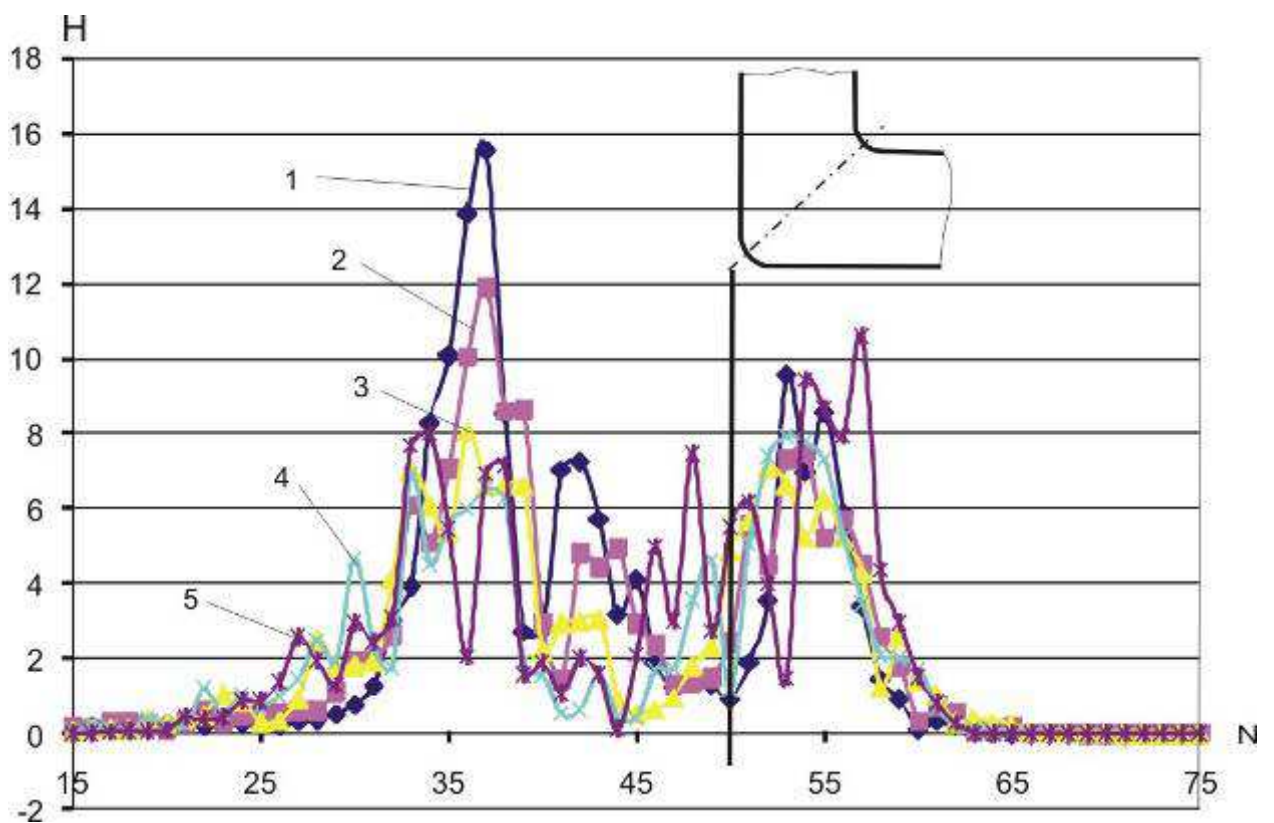


Рис. 1.78. Интенсивность скоростей деформаций сдвига, при $\Phi=90^\circ$

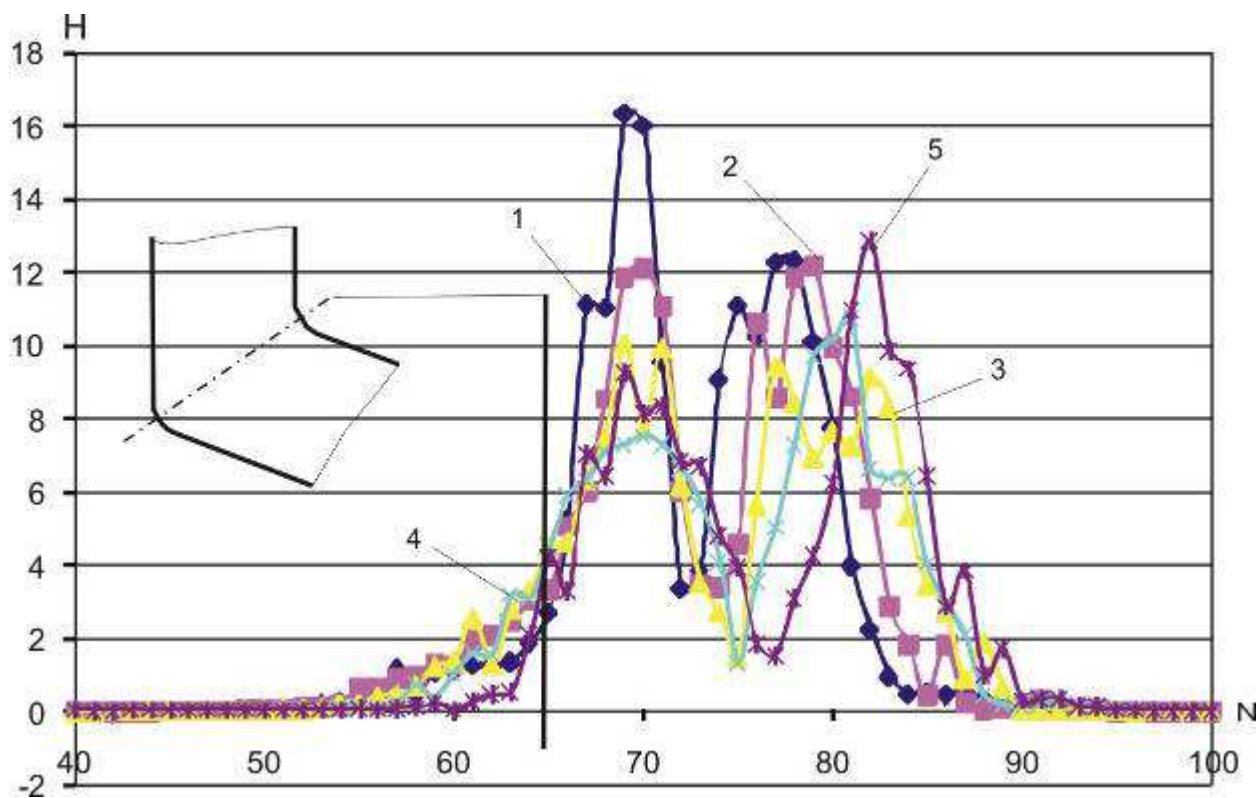


Рис. 1.79. Интенсивность скоростей деформаций сдвига, при $\Phi=110^\circ$

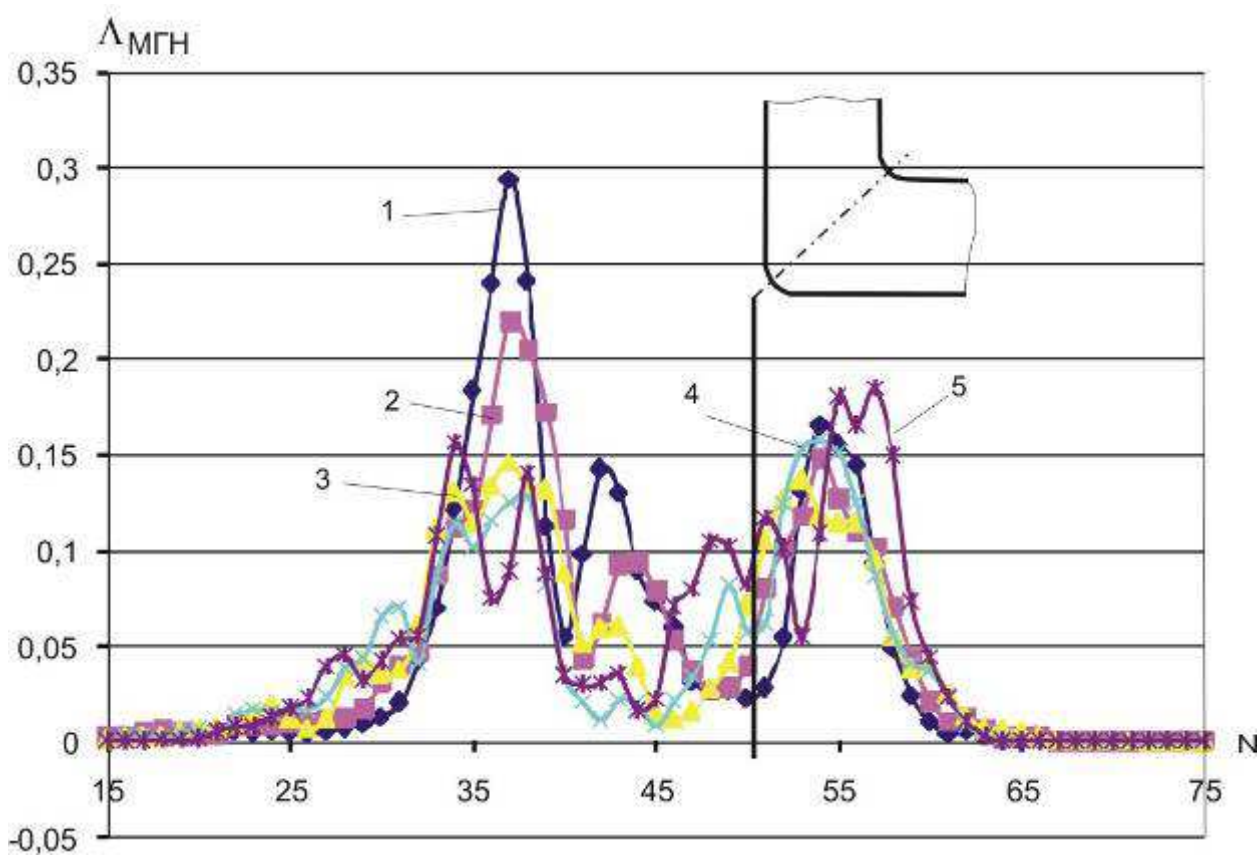


Рис. 1.80. Степень деформации сдвига мгновенная, при $\Phi=90^\circ$

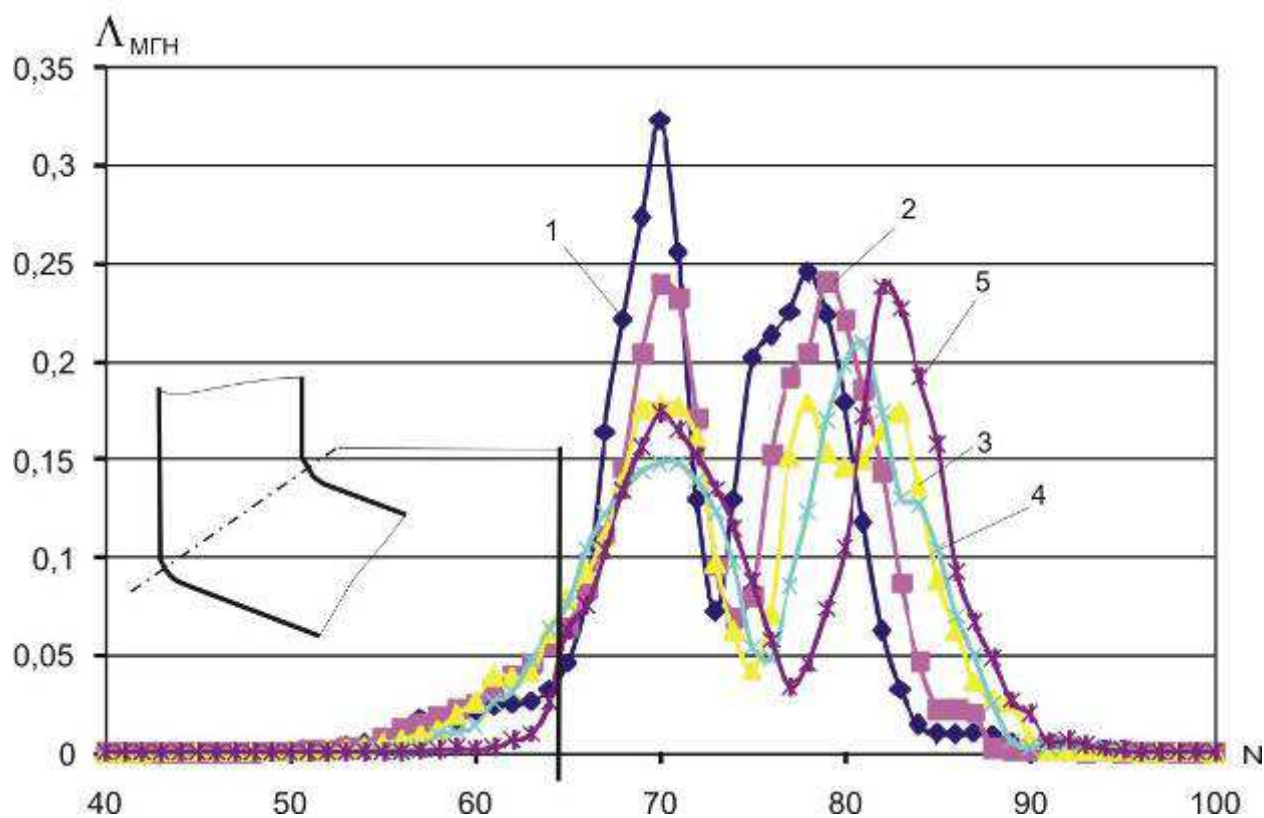


Рис. 1.81. Степень деформации сдвига мгновенная, при $\Phi=110^\circ$

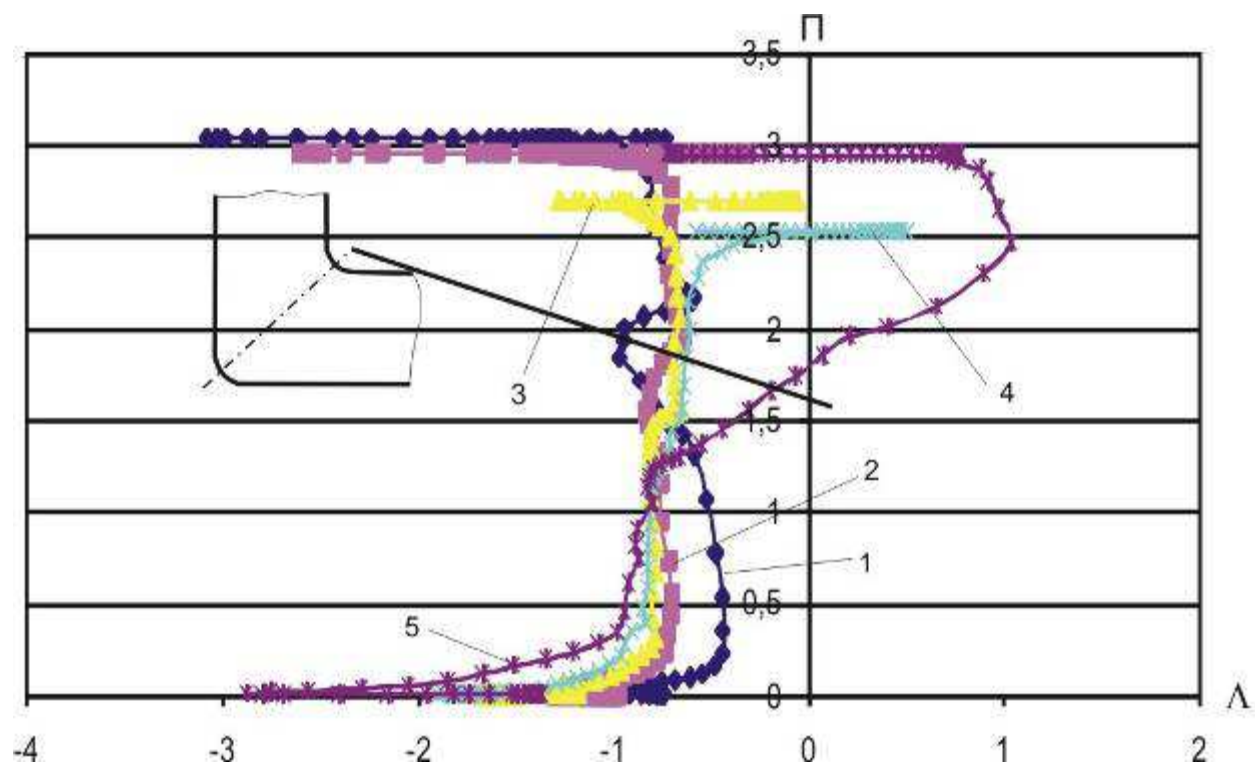


Рис. 1.82. Программа нагружения, при $\Phi=90^\circ$

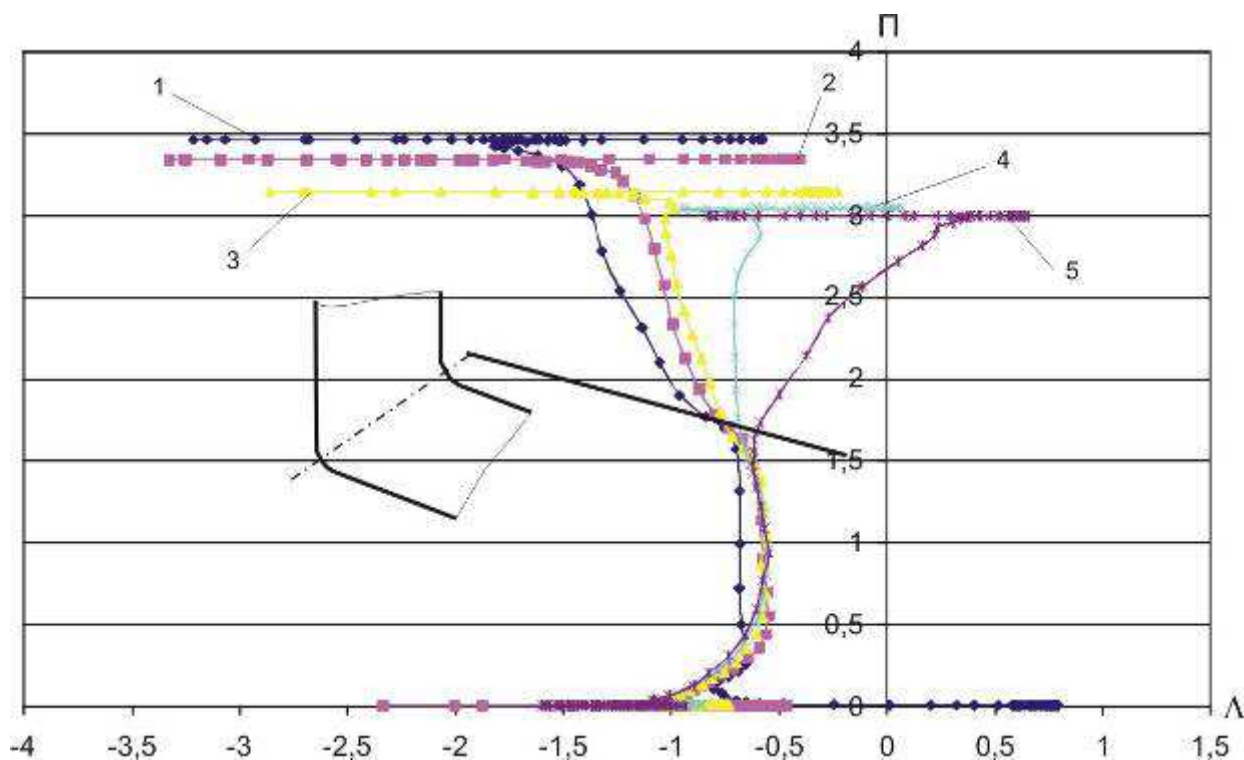


Рис. 1.83. Программа нагружения, при $\Phi=110^\circ$

Анализ полученных результатов показывает, что в процессе РКУП в очаге деформации возникает сложное напряженно-деформированное состояние.

Общей особенностью для обоих случаев РКУП является существенная неоднородность нормальных компонент тензоров напряжений вдоль линий тока.

Так, для компоненты σ_x при $\Phi=90^\circ$ для линий 1-3 характерны сопоставимые значения в начале и в конце линии тока, а для линий 4-5 значения σ_x в начале линии отрицательны, после перегиба – положительны. Еще большая неравномерность значений по линиям тока наблюдается для σ_x при $\Phi=110^\circ$.

Неоднородность распределения касательных напряжений σ_{xy} вдоль различных линий тока существенно меньше, чем нормальных напряжений. Для $\Phi=110^\circ$ в области после перегиба значения σ_{xy} находятся в диапазоне от -210 МПа до -190 МПа.

Анализ распределения компонент тензора деформаций показывает, что деформации по различным линиям тока изменяются более равномерно, чем напряжения.

Существенной особенностью является смещение области максимальных деформаций относительно линии перегиба при изменении угла пересечения каналов. При $\Phi=90^\circ$ основное деформирование происходит до линии перегиба, тогда как при $\Phi=110^\circ$ – после линии перегиба.

Еще одной особенностью при изменении угла Φ является большая неравномерность компонент тензора деформаций вдоль линий тока для $\Phi=90^\circ$. Так, для ε_x при $\Phi=110^\circ$ имеет место распределение с одним максимумом. При $\Phi=90^\circ$ распределение ε_x имеет два локальных максимума – первый на участке от точки 30 до точки 42, и второй на участке от точки 43 до точки 55.

Такая неравномерность обуславливает существенно больший разброс значений компонент тензора скоростей деформаций сдвига вдоль линий тока для $\Phi=90^\circ$. Качественно картины распределения компонент тензора скоростей деформаций сдвига вдоль линий тока подобны и при $\Phi=90^\circ$, и при $\Phi=110^\circ$.

Для ξ_x наблюдается вначале увеличение до максимальных значений, затем уменьшение до минимальных значений, и затем увеличение до нуля. Значения ξ_y изменяются в обратном порядке – сначала переход в отрицательную область и уменьшение до минимума, затем переход в положительную область, увеличение значений до максимума и уменьшение значений до нуля. Качественная картина изменения скоростей деформаций ξ_{xy} соответствует изменению ξ_y .

Анализ изменения интенсивности касательных напряжений T при $\Phi=90^\circ$ показывает, что в начале линии тока значения T практически не изменяются и составляют около 200 МПа, после перегиба значения T уменьшаются. Для $\Phi=110^\circ$ вначале линий тока значения T для разных

линий тока различны, однако в области перегиба (непосредственно в очаге деформации) значения T для разных линий тока близки между собой и практически не изменяются.

Несмотря на существенно различный характер формирования напряженного состояния для РКУП при различных углах пересечения каналов, интегральный показатель напряженного состояния – показатель напряженного состояния Π , – изменяется вдоль линий тока с одинаковыми закономерностями.

В области линии перегиба (непосредственно очаг деформации) значение показателя составляет около $-0,57$, что соответствует сжатию. После очага деформации с увеличением номера линии тока значения Π уменьшаются до меньших (по абсолютному значению) величин, а линии тока 4-5 переходят в положительную область. При этом с увеличением номера линии тока абсцисса экстремального значения (положение минимума или максимума относительно линии перегиба) приближается к линии перегиба.

Существенный разброс компонент тензора скоростей деформаций для $\Phi=90^\circ$ обуславливает и значительный разброс значений вдоль линий тока и для интегральных значений деформированного состояния. Распределение H имеет существенный разброс вдоль линий тока. Для $\Phi=110^\circ$ разброс значений меньше, обращает на себя внимание наличие двух максимумов в распределении H .

Мгновенные значения степени деформации сдвига $A_{мгн}$ получены интегрированием значений H , в связи с чем разброс значений $A_{мгн}$ вдоль линий тока меньше, чем разброс H . Качественно картины распределения $A_{мгн}$ вдоль линий тока сопоставимы и для $\Phi=90^\circ$, и для $\Phi=110^\circ$. И в том и в другом случае наблюдается два локальных максимума. При $\Phi=90^\circ$ значение в первом локальном максимуме несколько больше, чем во втором максимуме. При $\Phi=110^\circ$ значения в первом и во втором максимуме сопоставимы между собой.

Полученные в итоге программы нагружения для РКУП имеют ряд особенностей. Программы нагружения стартуют при значениях Π в диапазоне от -0,7 до -0,5, что приблизительно можно оценить как сжатие. Далее в условиях незначительного изменения Π происходит накопление деформации – при $\Phi=90^\circ$ для линий тока 1-4 практически вся деформация накапливается без существенного изменения показателя напряженного состояния, и только для линии тока 5 происходит значительное увеличение показателя напряженного состояния (свыше +1).

При $\Phi=110^\circ$ при незначительном изменении показателя напряженного состояния накапливается около 53% деформации, при пересечении линии перегиба происходит расхождение программ нагружения. По линиям тока 1-3 деформация накапливается в условиях "смягчения" схемы нагружения, по линии тока 5 – в условиях "ужесточения" схемы нагружения.

Таким образом, с использованием результатов конечно-элементного моделирования были получены качественные модели накопления деформации в условиях изменения напряженного состояния в очаге деформации при деформационном наноструктурировании.

Рассмотрим, какое состояние металла может формироваться под действием программ нагружения.

1.2.2. Результаты аналитических исследований влияния программ нагружения интенсивной пластической деформации на формирование и трансформацию состояния поверхностного слоя

Под действием программы нагружения в металле происходит накопление поврежденности и трансформация структурного состояния.

Поврежденность материала может быть оценена с использованием показателя исчерпания запаса пластичности Ψ . начальному (бездефектному) состоянию материала соответствует $\Psi=0$, в момент полного исчерпания запаса пластичности происходит разрушение материала, при этом $\Psi=1$.

В качестве критерия для расчета Ψ был выбран критерий Калпина-Филиппова при степенной аппроксимации кривой течения [11-12]:

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_k} \left[n \varphi_0 \varepsilon_i^{n-1} + (1 - \varphi_0 \varepsilon_p^n(K)) \frac{1}{\varepsilon_p(K)} \right] d\varepsilon_i, \quad (1.17)$$

или, в категориях степени деформации сдвига,

$$\Psi = \int_0^{\Lambda_k} \left[n \varphi_0 \Lambda_i^{n-1} + (1 - \varphi_0 \Lambda_p^n(\Pi)) \frac{1}{\Lambda_p(\Pi)} \right] d\Lambda_i. \quad (1.18)$$

где φ_0 и n – коэффициенты степенной аппроксимации кривой течения; Λ_n – степень деформации сдвига, накопленная на стадии нагружения; Λ_i – степень деформации сдвига, накопленная на i -ом этапе нагружения; Λ_p – предельная степень деформации сдвига.

Использование критерия Калпина-Филиппова для оценки поврежденности обусловлено тем, что в отличие от других критериев (линейного и нелинейного критериев В.Л. Колмогорова [13-14], А.А. Богатова [15-16], С.В. Смирнова [17], В.А. Огородникова [18] и др.) этот критерий позволяет получить более точное описание физического состояния материала с точки зрения двойственной природы пластической деформации (накопление поврежденности с одной стороны и возникновение упрочнения – с другой).

В общем виде аналитическое описание программы нагружения может быть представлено в виде схемы, показанной на рис. 1.84.

Аналитически каждый участок программы нагружения может быть аппроксимирован функциональной зависимостью вида $\Lambda = ae^{b\Pi} + c$.

Для расчета параметров состояния важным является оценка влияния формы участков квазимонотонной деформации программы нагружения на значения этих параметров.

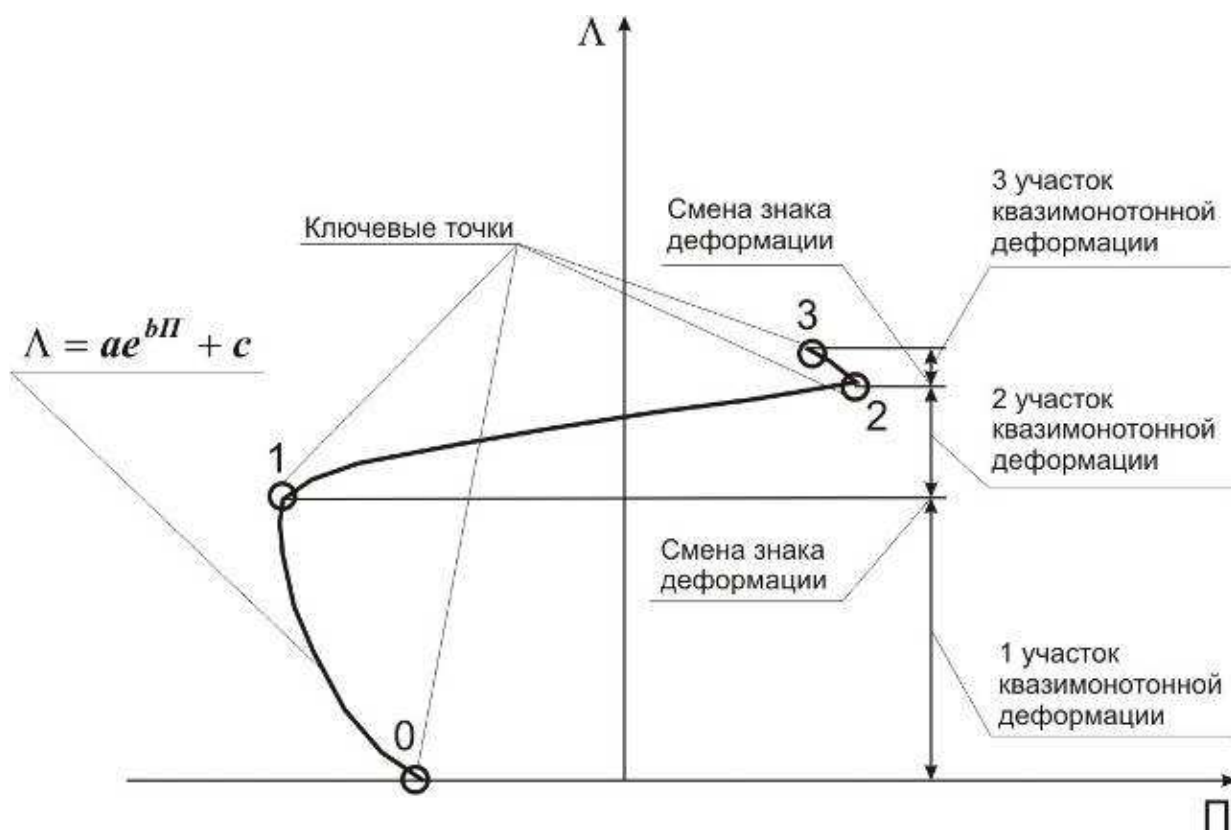


Рис. 1.84. Схема программы нагружения

Рассмотрим участки программ нагружения, ключевые точки которых совпадают, а форма отличается:

- ПН_{пр} – программа нагружения, которая проходит через ключевые точки по прямой;
- ПН₊ – более "жесткая" программа нагружения;
- ПН₋ – более "мягкая" программа нагружения.

Порядок построения "мягких" и "жестких" программ нагружения иллюстрируется на рис. 1.85. Точки программы ПН_{пр} определяют по уравнению прямой, проходящей через заданные ключевые точки. Точки программы ПН₊ получают путем сдвига в направлении увеличения показателя схемы напряженного состояния (в более "жесткую" область). Точки программы ПН₋ получают путем сдвига в направлении уменьшения показателя схемы напряженного состояния (в более "мягкую" область). Величина сдвига тем больше, чем ближе точка к середине участка программ нагружения.

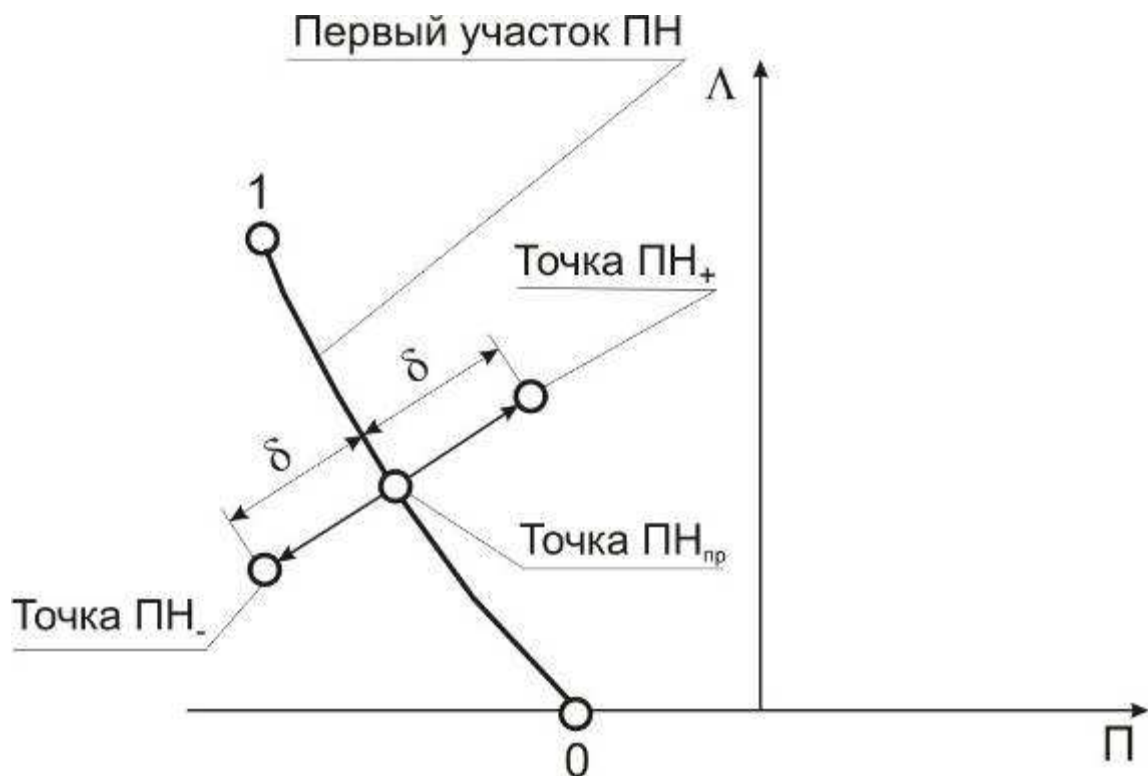


Рис. 1.85. К построению "мягких" и "жестких" программ нагружения

Полученные таким образом модельные программы нагружения показаны на рис. 1.86.

В работе было проведено аналитическое исследование влияния формы программы нагружения на показатель истощения запаса пластичности. Результаты показаны на рис. 1.87. По оси абсцисс отложено суммарное отклонение точек соответствующей программы нагружения от точек ПН_{пр}. Для каждого отклонения было получено две точки, верхняя точка соответствует программе нагружения, сдвинутой в более жесткую область (ПН₊), нижняя точка – в мягкую область (ПН₋).

Анализ полученных результатов показывает, что форма программы нагружения оказывает существенное влияние на расчетное значение степени истощения запаса пластичности. Так, уже при минимальном отклонении программы нагружения ($\delta=0,1$) значение Ψ изменяется более чем на 7%. При дальнейшем увеличении отклонения δ разница между Ψ , рассчитанному по программам нагружения ПН₊ и ПН₋, может увеличиться более чем в два раза.

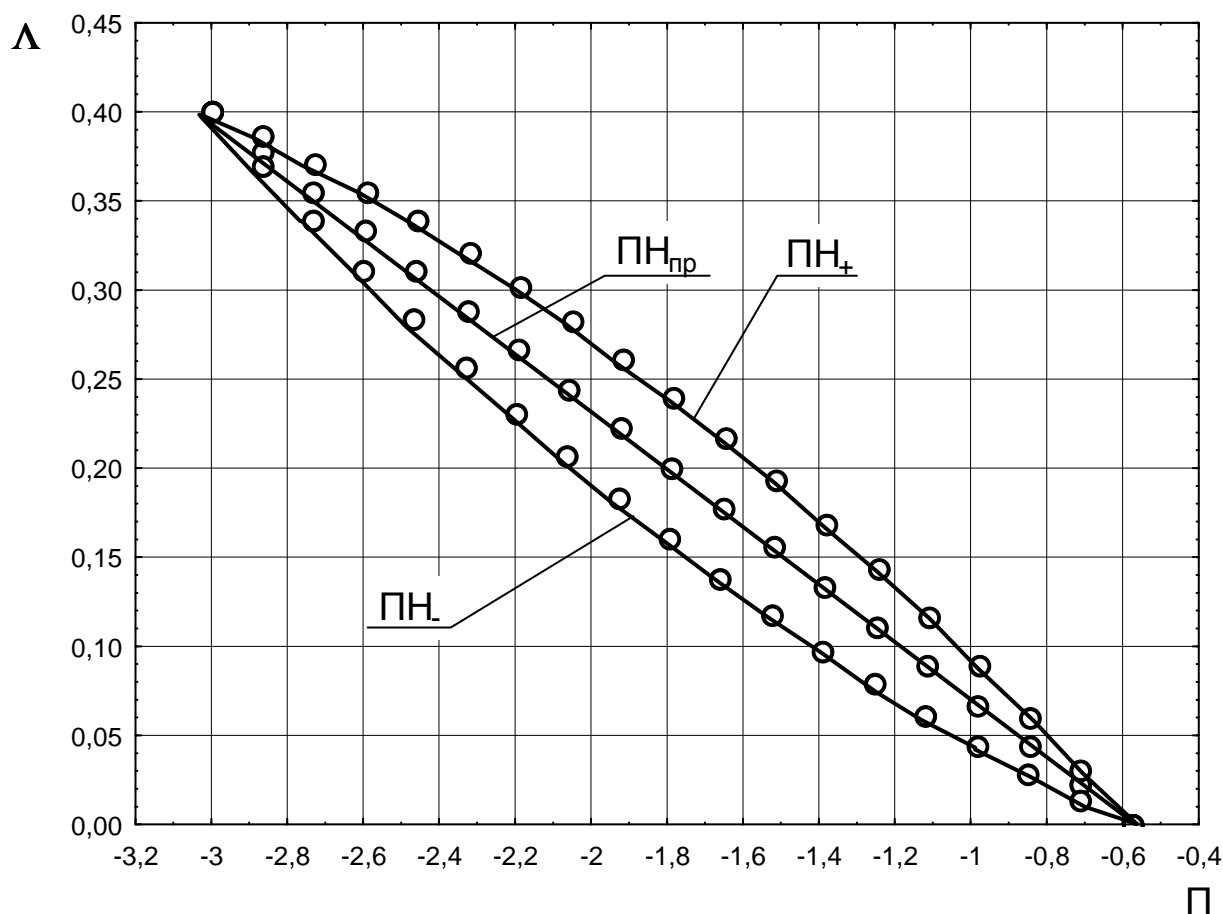


Рис. 1.86. Участки программ нагружения с совпадающими ключевыми точками и несовпадением формы

Изменение степени истощения запаса пластичности тем больше, чем больше точек на данном участке программы нагружения, в которых производится расчет мгновенных значений Ψ .

Таким образом, для достоверной оценки степени истощения запаса пластичности описания программы нагружения в категориях ключевых точек недостаточно. Необходимо получить модели взаимосвязи между геометрическими параметрами очага деформации и коэффициентами аппроксимации участков программы нагружения.

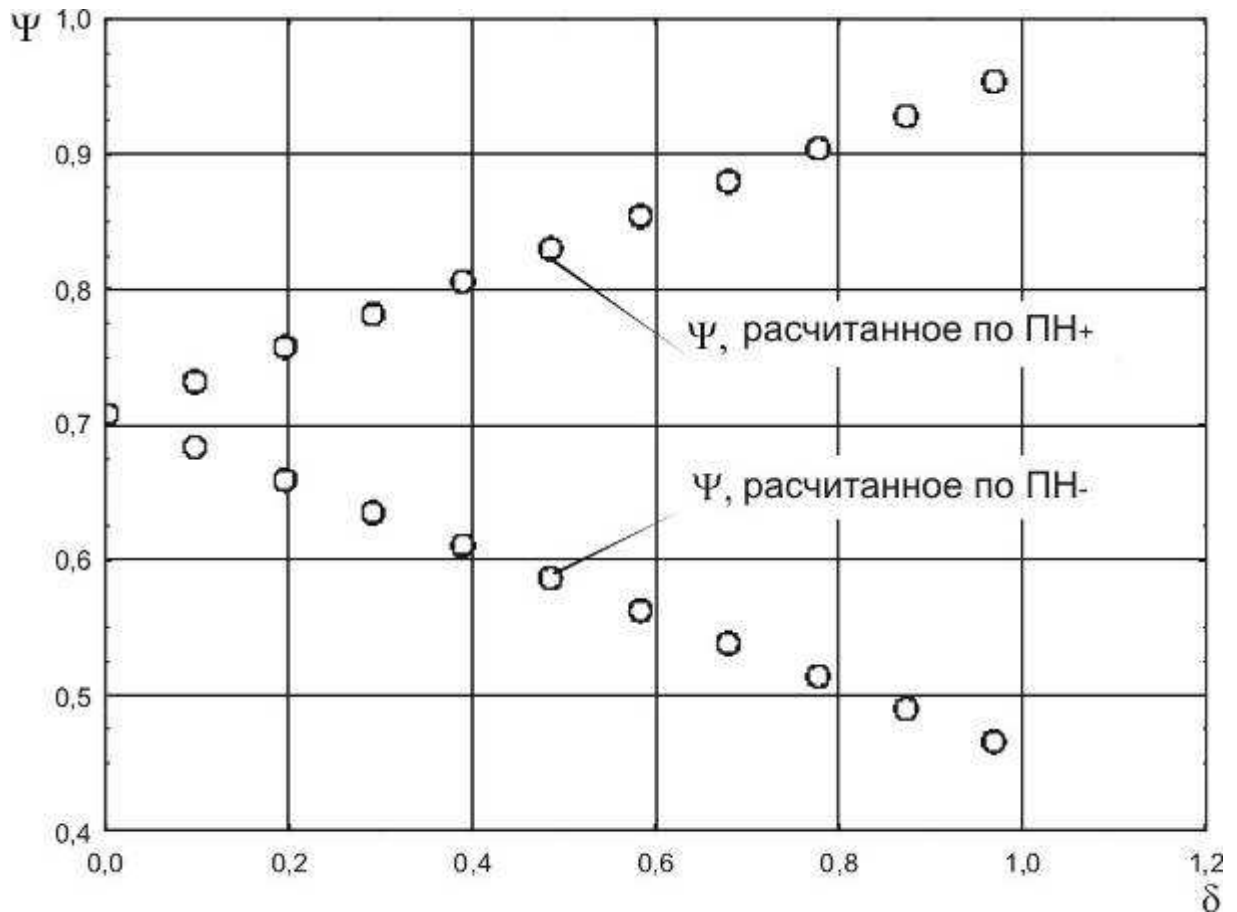


Рис. 1.87. Значения степени истощения запаса пластичности при изменении формы программы нагружения

Предварительный анализ показывает, что аппроксимация участков программы нагружения в общем виде возможна с помощью следующих функций:

$$\Lambda = a_{ij}^{ПН} \exp(b_{ij}^{ПН} \Pi) + c_{ij}^{ПН}, \quad \Lambda = a_{ij}^{ПН} \exp(b_{ij}^{ПН} \Pi^2) + c_{ij}^{ПН}, \quad (1.19)$$

где $a_{ij}^{ПН}$, $b_{ij}^{ПН}$ и $c_{ij}^{ПН}$ – коэффициенты аппроксимации.

Имея значения показателя напряженного состояния и степени деформации сдвига в двух ключевых точках можно определить только два коэффициента в зависимостях (1.19) – $a_{ij}^{ПН}$ и $b_{ij}^{ПН}$.

Зависимость значений коэффициента $c_{ij}^{ПН}$ от мощности очага деформаций w , который характеризует интенсивность пластического течения, показана на рис. 1.88.

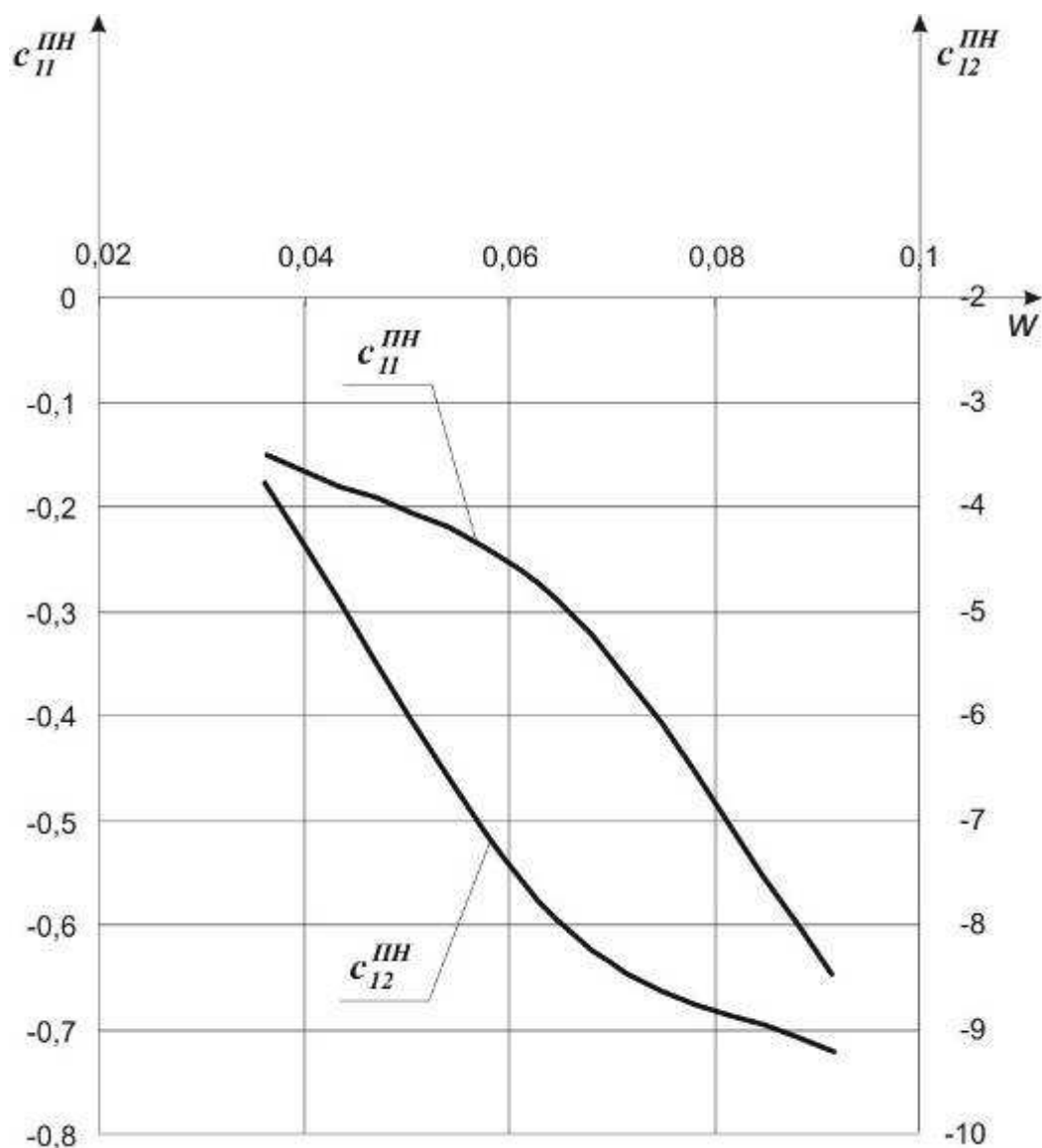


Рис. 1.88. Зависимость коэффициентов $c_{ij}^{ПН}$ от мощности очага деформации

Анализ результатов показывает, что коэффициенты $c_{ij}^{ПН}$ с уменьшением мощности очага по абсолютному значению убывают.

Для описания зависимости коэффициентов $c_{11}^{ПН}$ и $c_{12}^{ПН}$ от параметров очага деформации предлагается использовать выражение в виде

$$c_{ij}^{ПН} = a_{c_{ij}^{ПН}} (dh_6)^{b_{c_{ij}^{ПН}}} \quad (1.20)$$

Зная коэффициент $c_{ij}^{ПН}$ и значения показателя напряженного состояния и степени деформации сдвига в двух ключевых точках можно определить и

другие коэффициенты. Значение коэффициента b_{ij}^{PH} определяется численным решением уравнения

$$\frac{\Lambda_1 - c_{ij}^{PH}}{\Lambda_2 - c_{ij}^{PH}} = \frac{\exp(b_{ij}^{PH} \Pi_1)}{\exp(b_{ij}^{PH} \Pi_2)}, \quad \frac{\Lambda_1 - c_{ij}^{PH}}{\Lambda_2 - c_{ij}^{PH}} = \frac{\exp(b_{ij}^{PH} \Pi_1^2)}{\exp(b_{ij}^{PH} \Pi_2^2)}. \quad (1.21)$$

Коэффициент a_{ij}^{PH} можно определить как

$$a_{ij}^{PH} = \frac{\Lambda_1 - c_{ij}^{PH}}{\exp(b_{ij}^{PH} \Pi_1)}; \quad a_{ij}^{PH} = \frac{\Lambda_1 - c_{ij}^{PH}}{\exp(b_{ij}^{PH} \Pi_1^2)}. \quad (1.22)$$

Для аналитического определения структурного состояния металла поверхностного слоя как результата действия программы нагружения ранее были предложены общие аналитические модели

$$\begin{aligned} \Lambda_{MO} &= f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots\}, \Lambda_{ПФ}) \\ \xi_{MO} &= f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots\}, \Lambda_{ПФ}) \\ \Lambda(\Pi) &= f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots\}), \\ \delta_{MO} &= f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots\}, \delta_{НО}, \Lambda_{ПФ}, \Lambda_{МО}, \xi, \Lambda(\Pi)) \\ \gamma_{MO} &= f(\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots\}, \gamma_{НО}, \Lambda_{ПФ}, \Lambda_{МО}, \xi, \Lambda(\Pi)) \end{aligned} \quad (1.23)$$

где $\{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots\}$ – множество, определяющее элементы режимов механической обработки.

Для практического представленных выражений необходимо получить результаты экспериментальных исследований, выполнение которых планируется в рамках реализации последующих этапов данного проекта.

2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ШЛИФОВ

2.1. Методика пробоподготовки образцов для проведения исследований методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии

Экспериментальные образцы для исследований наноструктурного состояния материала поверхностного слоя (ПС) изготавливались из отожженной стали 45 гост 1050-88 одной поставки. Экспериментальные образцы представляли собой кольца и цилиндрические заготовки, наружная поверхность которых подвергалась упрочняющей механической обработке интенсивным поверхностным пластическим деформированием.

Для проведения исследований методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии являлась необходимой пробоподготовка имеющихся образцов.

Для указанных исследований необходимо выбрать образцы, обработка которых сопровождалась наиболее интенсивной пластической деформацией. В качестве исходного использовался недеформированный образец, не подвергавшийся упрочняющей обработке.

Интенсивность пластической деформации определялась для каждого экспериментального образца по результатам работы [1].

Перед проведением исследований из образцов по схеме, представленной на рисунке 2.1 осуществлялась вырезка фрагментов размером не более 5 x 5 x 5 мм. Сегменты вырезались на электроэрозионном станке для исключения влияния операции вырезки на структурное состояние исследуемого металла.

Таким образом, вырезанный сегмент имел форму куба с одной радиусной поверхностью, которая являлась упроченной поверхностью исходного образца.

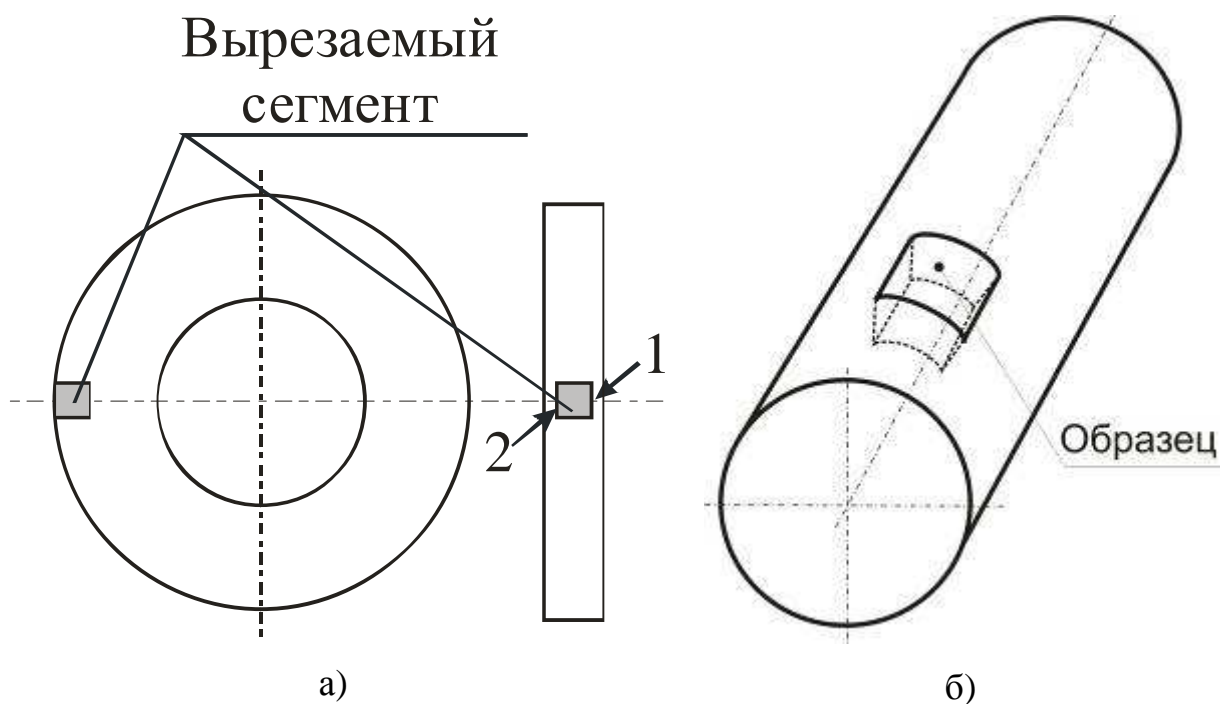


Рис. 2.1. Схема расположения сегментов, вырезаемых для исследований структурного состояния металла поверхностного слоя: а) – при использовании образцов в виде колец; б) – при использовании цилиндрических образцов

Далее сегменты заливались в самоотвердеющую пластмассу с целью приготовления металлографических шлифов, осуществлялась полировка 2-х взаимно параллельных сторон (стрелки 1 и 2 на рис. 2.1, а). Использование самозатвердевающей пластмассы позволило исключить «завалы» кромок образца при полировании. Впоследствии пластмасса удалялась. После полирования с использованием стандартных методик на одной из 2-х взаимно параллельных сторон фрагмента кубической формы травлением получали металлографические шлифы.

2.2. Методика пробоподготовки для проведения металлографии образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации кручением со сжатием

Схема интенсивной пластической деформации кручением со сжатием была реализована на образцах в виде медной проволоки.

Для проведения исследований проводилась заливка частей проволоки в эпоксидный клей. В дальнейшем проводилась фрезеровка участка образца шириной 20÷24 мм, на глубину 0,45 мм, т.е. до центра сечения. Проводилась шлифовка образцов и их травление раствором 50 мл 3%-ного H_2O_2 + 50 мл NH_3 .

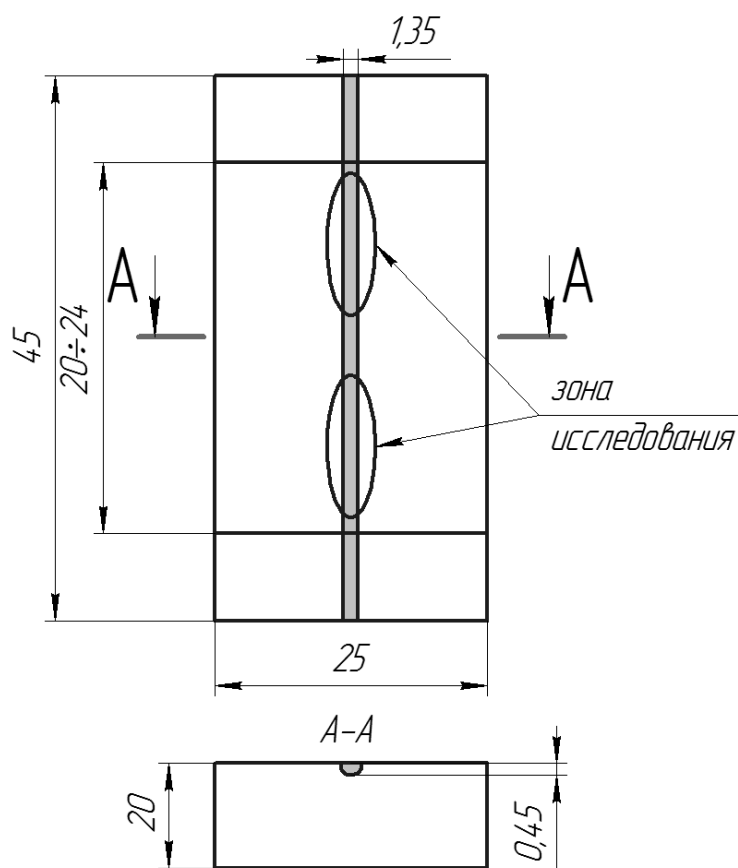


Рис. 2.2. Общий вид образца при проведении металлографии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения отчетного этапа исследований:

1. Проведено моделирование закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния при интенсивной пластической деформации металла в процессе упрочняющей обработки поверхностного слоя роликами специальных профилей. Предложено 3 типа роликов специального профиля. Проводится подготовка документов к патентованию конструкции данных роликов. При моделировании напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя использовался метод конечных элементов, основными достоинствами которого являются универсальность и высокая точность получаемых решений. Результаты моделирования очага деформации для всех предлагаемых типов роликов специального профиля показали картину напряженно-деформированного состояния существенно отличную от наблюдаемой при традиционных способах поверхностного пластического деформирования.

2. Установлены закономерности накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя в процессе упрочняющей обработки роликами специальных профилей.

Анализ показал, что при обработке роликом специального профиля 1-го типа накопление деформации и исчерпание запаса пластичности носит волнообразный характер, при этом накапливаются феноменально малые значения степени деформации сдвига $\Lambda = 0,046$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,02$.

Также установлено, что при обработке роликом специального профиля 1-го типа имеется больший, чем при традиционных схемах ППД, диапазон управления программой нагружения, а сама программа нагружения обнаруживает вертикальные участки, наличие которых свидетельствует о возможности наноструктурирования металла поверхностного слоя.

При обработке роликом специального профиля 2-го типа накопление деформации и исчерпание запаса пластичности также носит волнообразный характер. При этом накапливаются сравнительно небольшие значения степени деформации сдвига $\Lambda = 0,52$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,1$.

Одной из особенностей обработки роликом с профилем 2-го типа является соотношение итоговых накопленных значений Λ/Ψ , составляющее 5,2, в то время как при обработке деталей ППД традиционными роликами это соотношение не превышает $\Lambda/\Psi = 1,5$. Полученная программа нагружения также обнаруживает участки, близкие к вертикальным.

Анализ показал, что при обработке роликом специального профиля 3-го типа накопление деформации и исчерпание запаса пластичности носит двухступенчатый характер. При этом накапливаются сравнительно большое значение степени деформации сдвига $\Lambda = 3..3,2$ при докритических значениях степени исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,6..0,7$.

3. Проведены аналитические исследования закономерностей пластического течения металла при деформационном наноструктурировании, определены координаты точек линий тока, произведен перерасчет компонент напряженно-деформированного состояния и расчет параметров механического состояния в этих точках. Получено описание программ нагружения, возникающих в процессе деформационного наноструктурирования.

4. Анализ формирования напряженно-деформированного состояния при деформационном наноструктурировании методом равноканального углового прессования показал, что угол пересечения каналов существенно влияет как на накопление деформации, так и на равномерность распределения компонент тензоров напряжений и деформаций. Это приводит к неравномерному деформированию в очаге деформации и возможности образования застойной зоны.

5. Проведены аналитические исследования влияния программ нагружения интенсивной пластической деформации на формирование и трансформацию состояния поверхностного слоя. Установлено, что на формирование состояния поверхностного слоя существенное влияние оказывает не только величина накопленной деформации, но и форма программы нагружения.

6. Проведена подготовка металлографических шлифов для экспериментальных исследований микро- и наноструктуры методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии.

На следующем этапе выполнения НИР планируется проведение экспериментальных исследований формирования и трансформации наноструктурного состояния и остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла под действием программ нагружения поверхностного слоя интенсивной пластической деформацией методами сканирующей электронной микроскопии, коэрцитиметрии, магнитошумового и рентгено-фазового анализа и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блюменштейн В. Ю. Механика поверхностного слоя при обработке размерным совмещенным обкатыванием / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Упрочняющие технологии и покрытия. - М.: Машиностроение, 2006. - №2(14). - С. 18-27.
2. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. - М.: Машиностроение, 2002. - 300 с.
3. Смелянский В. М. Механика формирования поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. - М., 1985. - 379 с.
4. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.
5. Кречетов А. А. Разработка методики проектирования технологических процессов обкатывания на основе раскрытия наследственных закономерностей влияния состояния поверхностного слоя на циклическую долговечность деталей машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. - М., 2003. - 241 с.
6. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния (RNDS_MDS). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611073. Заявка № 2002610824, дата поступления 13 мая 2002 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 июня 2002 г.
7. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А. Наследственная механика поверхностного слоя деталей машин. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610758. Заявка № 2002610463, дата поступления 29 марта 2002 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 мая 2002 г.

8. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. - М., 2002. - 595 с.
9. Nanostructured Materials. Science and Technology. Proc. Of NATO ASI ed. by G.M. Chow and N.I. Noskova. Dorducht, Boston, London Kluwer Acad. Publ., 1998, V.50, 457p.
10. Koch C.C., Cho Y.S. Nanocrystals by high energy ball milling. Nanostructured Materials, 1992, V.1, p.207 – 212.
11. Калпин Ю.Г., Филиппов Ю.К., Беззубов Н.Н. Оценка деформационной способности металлов в процессах холодной объемной штамповки // Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. – 1988. – № 10. – с. 1-16.
12. Филиппов Ю.К. Критерий оценки качества деталей, получаемых холодной объемной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 2. – С. 3-9.
13. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
14. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
15. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
16. Богатов А.А. О разрушении металлов при обработке давлением // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 8. – с. 2-7.
17. Смирнов С.В. Деформируемость и поврежденность металлов при обработке давлением: Автореферат дис. докт. техн. наук: 05.16.05. – Екатеринбург, 1998. – 38 с.
18. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – Киев: Вища школа, 1983. – 176 с.