

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССАХ ПОВЕРХНОСТО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (ППД) С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА УПРОЧНЯЕМОГО ТЕЛА

А.А. Худойназаров, *магистрант*,  
E-mail: [khudoinazarov1994@gmail.ru](mailto:khudoinazarov1994@gmail.ru); Шифр группы: 15.04.05.01. Второй курс.  
М.С. Махалов, *канд. техн. наук, доцент*,  
E-mail: [maxim\\_ste@mail.ru](mailto:maxim_ste@mail.ru)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Кузбасский государственный технический  
университет имени Т.Ф. Горбачева» 650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Известно, что остаточные напряжения (ОН) первого рода являются одним из ключевых параметров состояния металла ответственных деталей машин, в значительной степени определяющих их эксплуатационную долговечность, особенно в условиях приложения знакопеременных нагрузок [1].

Однако точный расчет напряжений, действующих в той или иной части детали, не всегда представляется возможным, большинство расчетных методик и алгоритмов определения ОН охватывают, как правило, простые (одно-, двухосные) виды нагружения и не позволяют проводить расчеты при сложных видах силового и температурного нагружения, имеющих место в процессах механической обработки и эксплуатации изделия [2].

Наряду с этим, значительное влияние на формирование и трансформацию ОН имеет явление технологического наследования (ТН), поскольку на протекание процессов на каждой последующей стадии оказывает влияние напряженно-деформированное состояние (НДС) металла, полученное деталью на предыдущих стадиях.

Среди способов механической обработки широкими возможностями по созданию в поверхностном слое (ПС) благоприятных сжимающих ОН близких по величине к пределу текучести металла обладают способы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) (рис. 1) [3].

При обработке ППД в зоне контакта деформирующих инструментов с деталью возникает асимметричный очаг деформации (ОД), в котором частицы металла смещаются вдоль некоторых вдоль линий тока, формируя ПС детали. Начальные параметры состояния, которые частицы металла имели до входа в очаг деформации (линия  $AG$ ), трансформируются в накопленные к моменту их выхода из ОД (линия  $GF$ ).

Решение задачи аналитического определения ОН после сложных видов нагружения, в том числе и после обработки ППД с учетом явления ТН

возможно на основе механики технологического наследования, в рамках которой [3-4]:

- формирование и трансформация состояния поверхностного слоя (ПС) на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного нагружения рассматриваются как единый непрерывный процесс накопления деформации, исчерпания запаса пластичности и трансформации ОН металлом поверхностного слоя. При этом, наряду с традиционными параметрами качества, для описания свойств ПС используются соответственно: накопленная степень деформации сдвига (СДС)  $\Lambda$ , степень исчерпания запаса пластичности (СИЗП)  $\Psi$  и компоненты тензора остаточных напряжений  $[T\sigma_{ост}]$  в системе координат, связанной с формой детали или элемента конструкции;

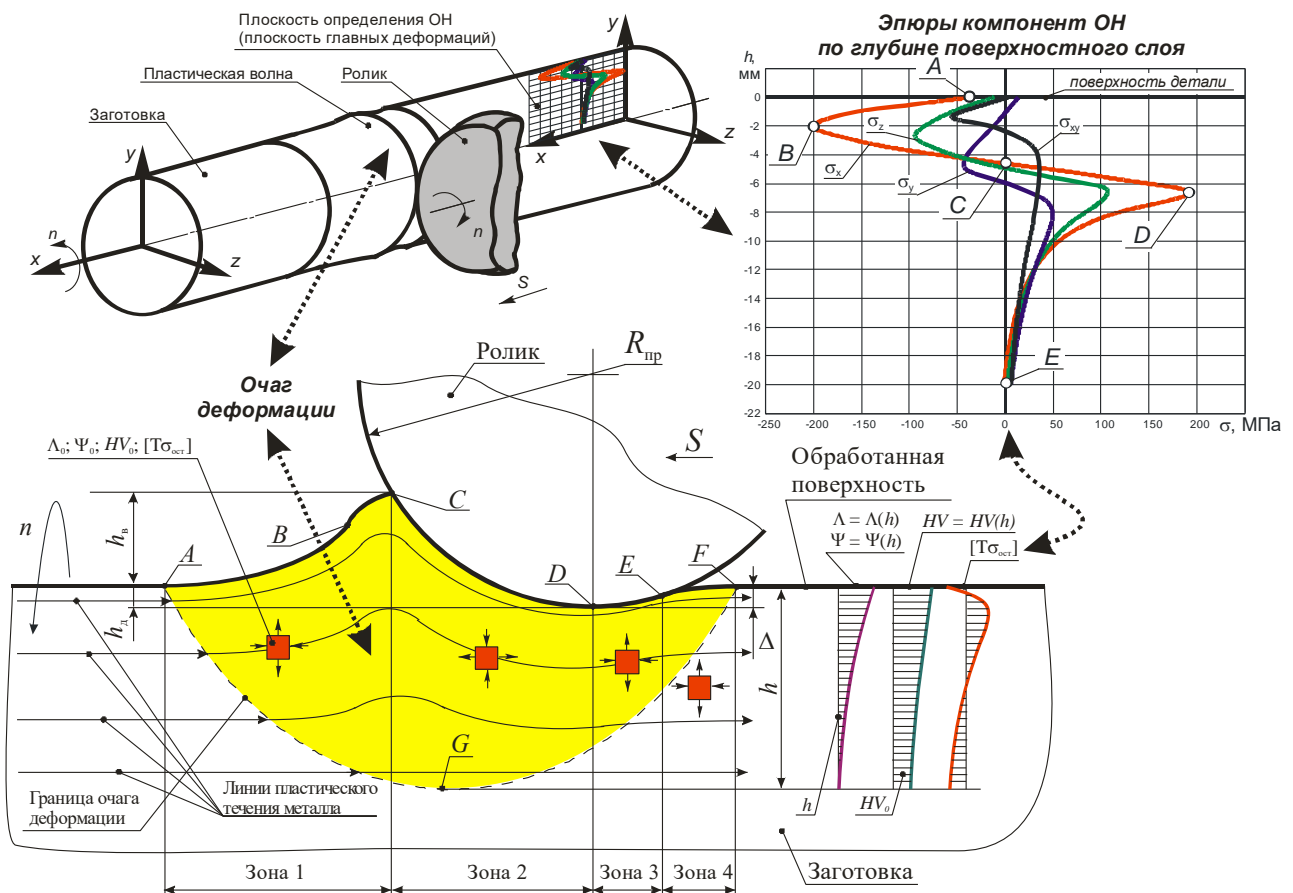


Рис. 1. Схема очага деформации в плоскости подачи при обработке ППД

- формирование и трансформация остаточных напряжений на стадиях механической обработки при изготовлении рассматриваются как следствие сложного немонотонного нагружения металла в очаге пластической деформации (ОД), при котором происходит накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя (ПС);

- формирование ОН происходит в условиях, изменяющихся вследствие пластической деформации механических свойств металла, т.е. на протекание процессов в каждой точке траектории внутри ОД влияет история нагружения;

- итоговые ОН проявляют себя в процессе эксплуатации, трансформируясь в каждом цикле эксплуатационного нагружения; долговечность определяется всей предисторией нагружения.

Однако, для полноценного учета явления ТН и его влияния на формирование итоговых свойств металла ПС необходимо создание модельных представлений о трансформации напряженно-деформированного состояния металла не только с учетом трансформации свойств, полученных на предыдущих стадиях, но и с учетом изменения этих свойств по мере продвижения частиц через пространство ОД на текущей стадии нагружения.

Для решения такой задачи была разработана конечно-элементная модель формирования ОН при упрочняющей обработке ПС металла ППД роликовым инструментом, учитывающая трансформацию свойств металла в ОД.

При создании модели были приняты следующие начальные условия и допущения:

1. Моделируемый материал принимался изотропным с параметрами механического состояния, соответствующими параметрам стали 45 (ГОСТ 1050-88) в состоянии поставки.

2. Возникающие деформации имели только механическую природу малого нагрева при рассматриваемом нагружении.

3. Использовалась билинейная аппроксимация кривой течения, учитывающая упрочнение металла (рис. 4).

4. Для упрощения расчетов, ввиду относительно невысокой величины возникающей погрешности, не учитывался эффект Баушингера.

5. Тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали был принят нулевым, поскольку для случая обработки ППД выполнялся ряд условий, указанных в работе [5], а также в силу того, что модель детали имела достаточно большие по сравнению с возникающим очагом деформации геометрические размеры.

6. Использовалась плоско-деформированная постановка, при этом процесс накопления деформаций, исчерпания запаса пластичности и формирования ОН моделировался в плоскости подачи, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки. По мнению В.М. Смелянского [6], поскольку высота волны и, соответственно, значения деформации в направлении подачи значительно больше, чем в окружном, плоскость подачи с механической точки зрения в большей степени отвечает понятию плоскости главных деформаций.

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали длиной  $L = 50$  мм и высотой  $h = 20$  мм (рис. 2). Нижняя и боковые границы фрагмента жестко закреплялись по обоим осям. Размеры возникающего при обработке очага напряженно-деформированного состояния значительно меньше моделируемого фрагмента, поэтому возникающие при такой постановке

краевые эффекты вносят в результаты моделирования весьма незначительную погрешность.

Индентор моделировался как абсолютно жесткое тело и представлял собой окружность, моделирующую ролик заданного профильного радиуса. Такое допущение правомерно, поскольку многочисленными исследованиями доказано, что при обработке ППД, деформирующие инструменты подвергаются весьма малому износу, при этом каких-либо значимых деформаций роликов или шариков зафиксировано не было.

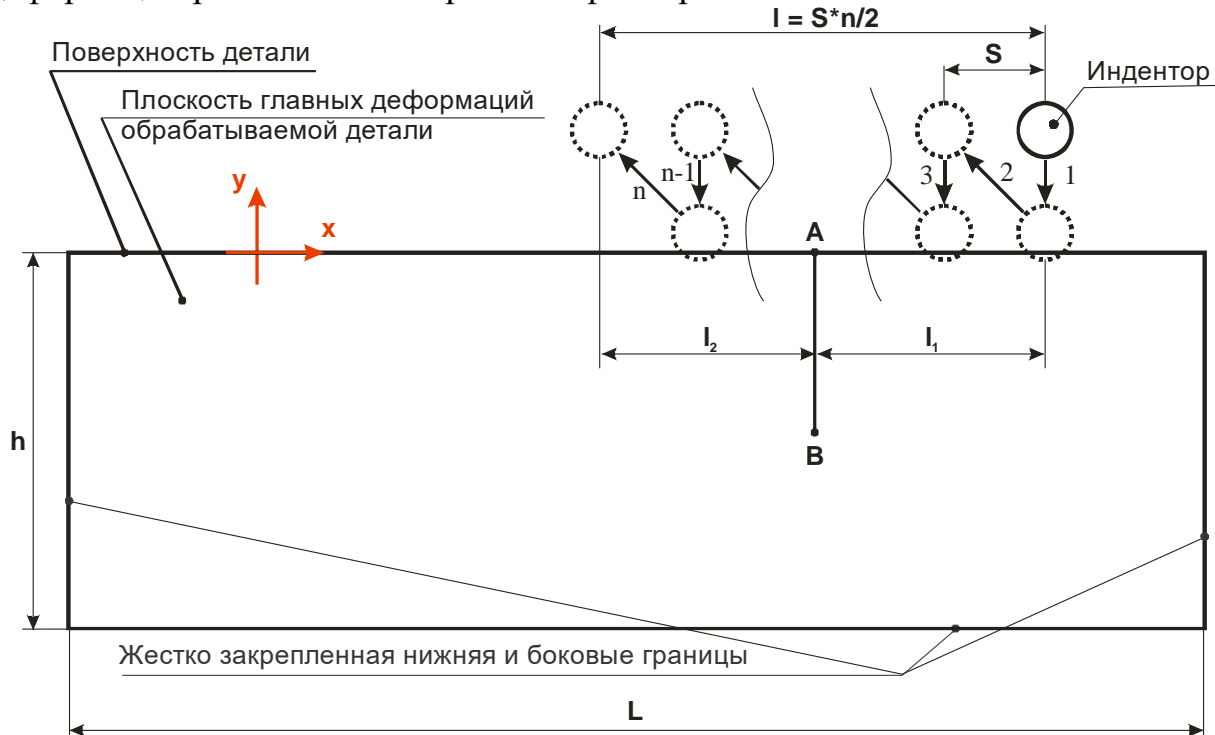


Рис. 2. Постановка задачи моделирования процесса обработки ППД

Если рассматривать плоскость главных деформаций (рис. 1-2), перемещение ОД в направлении подачи носит дискретный характер: новый ОД возникает со смещением относительно предыдущего на величину подачи, которая при обработке ППД обычно варьируется в пределах 0,05-0,3 мм/об.

В исходном положении индентор находился относительно поверхности с некоторым зазором.

На 1-ом и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности на некоторую величину, предполагающую внедрение и создание заданного при моделировании натяга.

На 2-ом и любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка – отвод индентора от поверхности на исходное расстояние с его одновременным перемещением вдоль поверхности на величину подачи.

Всего было смоделировано 300 шагов – 150 шагов нагружения и 150 шагов разгрузки. При этом, с учетом принятой величины подачи 0,1 мм/об, длина обработанной поверхности в представленной модели составила

$$l = S \cdot n / 2 = 15 \text{ мм.}$$

Основная идея моделирования заключалась в том, что некоторое сечение *AB* моделируемого фрагмента расположено таким образом, что на 1-ом шаге нагружения оно еще не попадает в пространство ОД. В то же время на предпоследнем шаге нагружения это сечение уже покинуло пространство ОД. В рассматриваемой модели расстояние  $l_1$  в направлении подачи от стартового положения индентора до сечения *AB* составило 5 мм, расстояние  $l_2$  в направлении подачи от сечения *AB* до конечного положения индентора составило 10 мм (рис. 2-3).

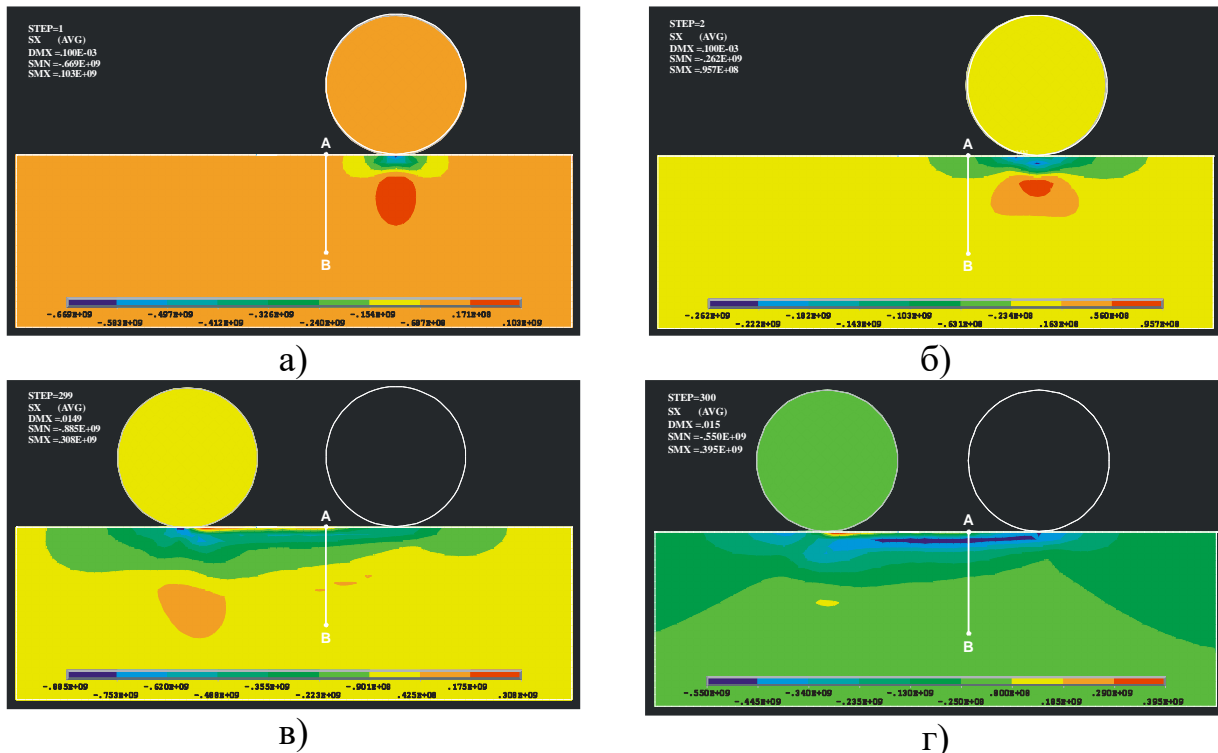


Рис. 3. Распределение осевых напряжений после моделирования:  
 а) 1-го шага (нагружение); б) 2-го шага (разгрузка);  
 в) 299-го шага (нагружение); г) 300-го шага (разгрузка)

Таким образом, в процессе реализации всех шагов моделирования указанное сечение проходит через пространство ОД и является тем сечением по глубине обработанного ПС, в котором произошло накопление деформаций, частичное исчерпание запаса пластичности и формирование тензора ОН с учетом изменяющихся свойств ПС. На рис. 3 в качестве примера представлено распределение осевых напряжений после 1-го, 2-го, 299-го и 300-го шагов нагружения. Отмечено сечение, в котором фиксируются параметры НДС на каждом шаге моделирования.

После решения модели в выделенном сечении *AB* для каждого шага моделирования фиксировались следующие значения: координаты узлов, составляющие вектора смещений узлов, компоненты тензора напряжений, компоненты тензора упругой, пластической и суммарной упруго-пластической деформации.

Для дальнейших расчетов по данным работ [3,6] угол деформации (пространство ОД) в окружном направлении был принят равным  $10^0$ . Частота вращения детали принята равной 300 об/мин. Таким образом, время одного оборота детали составило 0,2 с, а время одного цикла нагрузки-разгрузки ПС составило 0,0054 с. Было принято, что половину этого времени (0,0027 с) осуществляется нагружение и столько же - разгрузка ПС.

С целью выявления взаимосвязей накопленных параметров механического состояния и остаточных напряжений с режимами обработки ППД была построена и решена серия КЭ-моделей в соответствии с планом, приведенным в табл. 1.

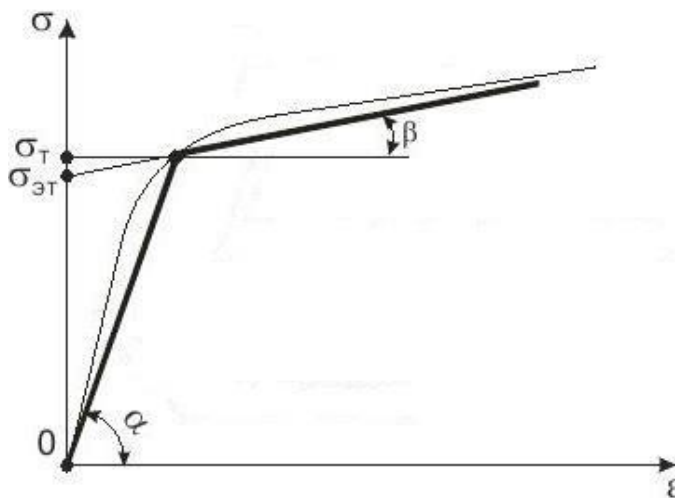


Рис. 4. Билинейная аппроксимация кривой течения

Таблица 1

План моделирования обработки ППД

Номера моделей	$R_{np}$ , мм			
	2	5	10	
$h_d$ , мм	0,03	1	2	3
	0,05	4	5	6
	0,07	7	8	9

Наряду с этим, для выявления доли эффекта упрочняемого тела (ЭУТ), для модели №5 также было выполнено моделирование процесса без учета эффекта упрочняемого тела.

Учет ЭУТ в КЭ модели осуществляется не только посредством представленной постановки задачи взаимодействия индентора с поверхностью, но и посредством задания формы кривой течения, предполагающей учет упрочнения через величину тангенциального модуля.

Так для моделей, учитывающих ЭУТ, значение тангенциального модуля выбиралось таким образом, чтобы максимально приблизить аппроксимирующую функцию к форме реальной кривой течения стали  $45 - T_{mod} = 2,596 \times 10^9$  МПа.

Для исключения ЭУТ необходимо задать нулевое значение тангенциального модуля, однако из соображений исключения неопределенности моделирования и для сохранения взаимосвязи напряжений и деформаций на участке пластического течения, значения данного параметра были уменьшены на 3 порядка и составили  $T_{mod} = 2,596 \times 10^6$  МПа (рис. 4).

В качестве примера, на рисунках 5-8 приведены результаты моделирования процесса ППД и последующего расчета параметров

механического состояния для модели №5 (табл. 1) соответственно с учетом и без учета ЭУТ.

На рисунках 5, 6 представлены очаги деформации, восстановленные по шагам нагружения и разгрузки. Модель без учета ЭУТ имеет значительно большую высоту пластической волны – 0,085 мм против 0,03 мм в модели с ЭУТ по циклам нагружения и почти 0,1 мм против 0,043 мм в модели с учетом ЭУТ по циклам разгрузки. На взгляд авторов это можно объясняется тем, что модель процесса, не учитывающая упрочнение, сохраняет исходные значения пластичности материала (до входа в ОД) в процессе движения частицы через все пространство ОД.

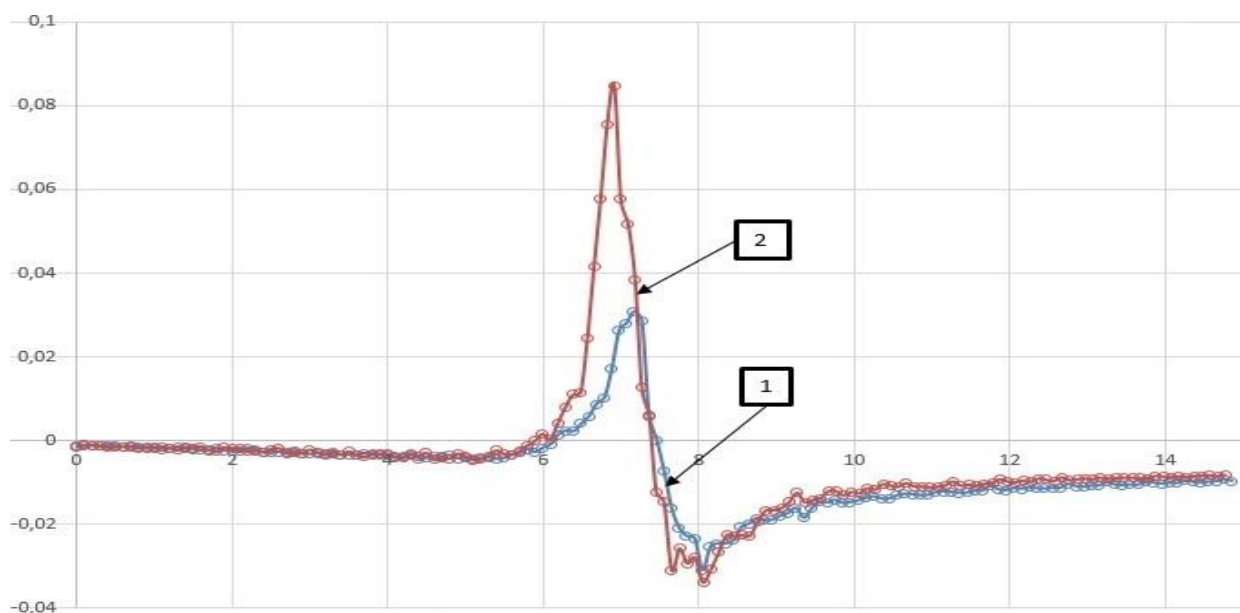


Рис. 5. Профили очага деформации, восстановленные по циклам нагружения с учетом (1) и без учета (2) эффекта упрочняемого тела

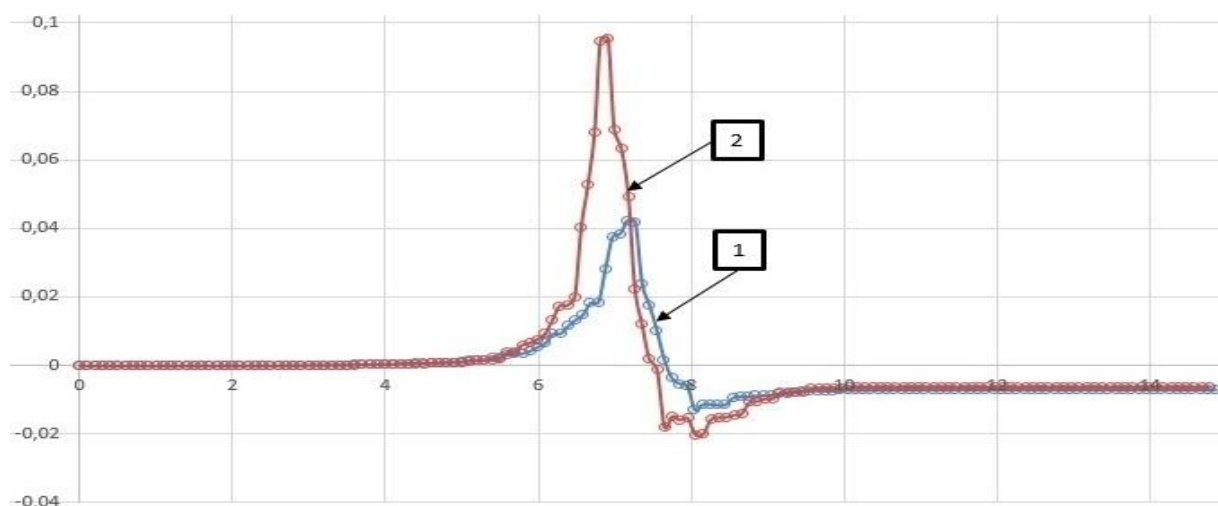


Рис. 6. Профили очага деформации, восстановленные по циклам разгрузки с учетом (1) и без учета (2) эффекта упрочняемого тела

Программы нагружения (рис. 7) имеют примерно одинаковые показатели на старте, однако максимальные значения показателей схемы

напряженного состояния по циклам нагрузки составляют примерно  $\Pi = -4,4$  для модели с учетом ЭУТ и  $\Pi = -6,1$  для модели без учета ЭУТ.

Наибольшими значениями сжимающих напряжений характеризуется осевой компонент ОН, что хорошо согласуется с результатами, полученными авторами ранних работ (рис. 8).

При этом большие по величине сжимающие напряжения (-600 МПа) обнаруживает модель с учетом эффекта упрочняемого тела (-430 МПа модель без учета ЭУТ).

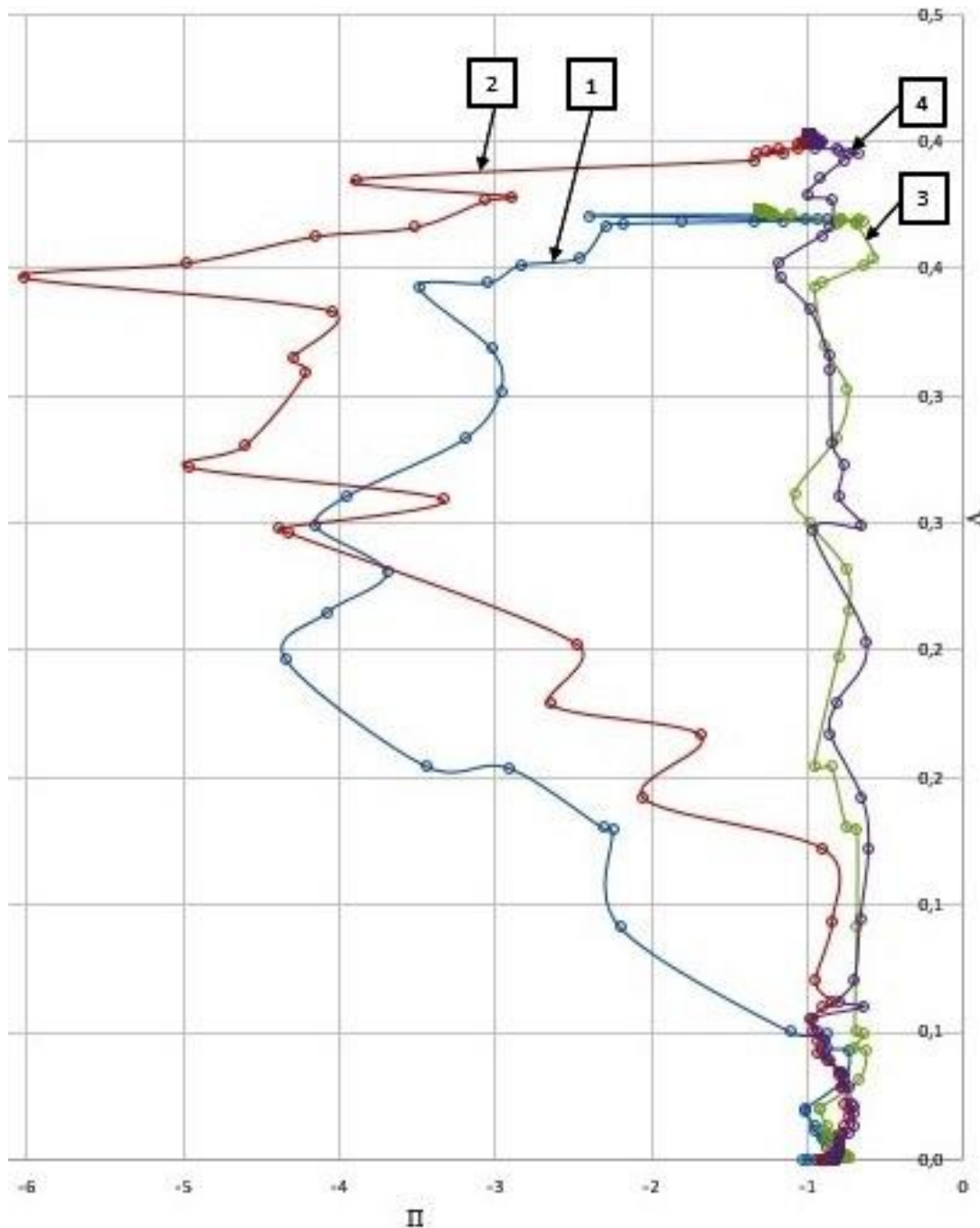


Рис. 7. Программы нагружения поверхностного слоя на уровне обрабатываемой поверхности ( $y = 0$  мм): по циклам нагружения с учетом (1) и без учета (2) ЭУТ; по циклам разгрузки с учетом (3) и без учета (4) ЭУТ;



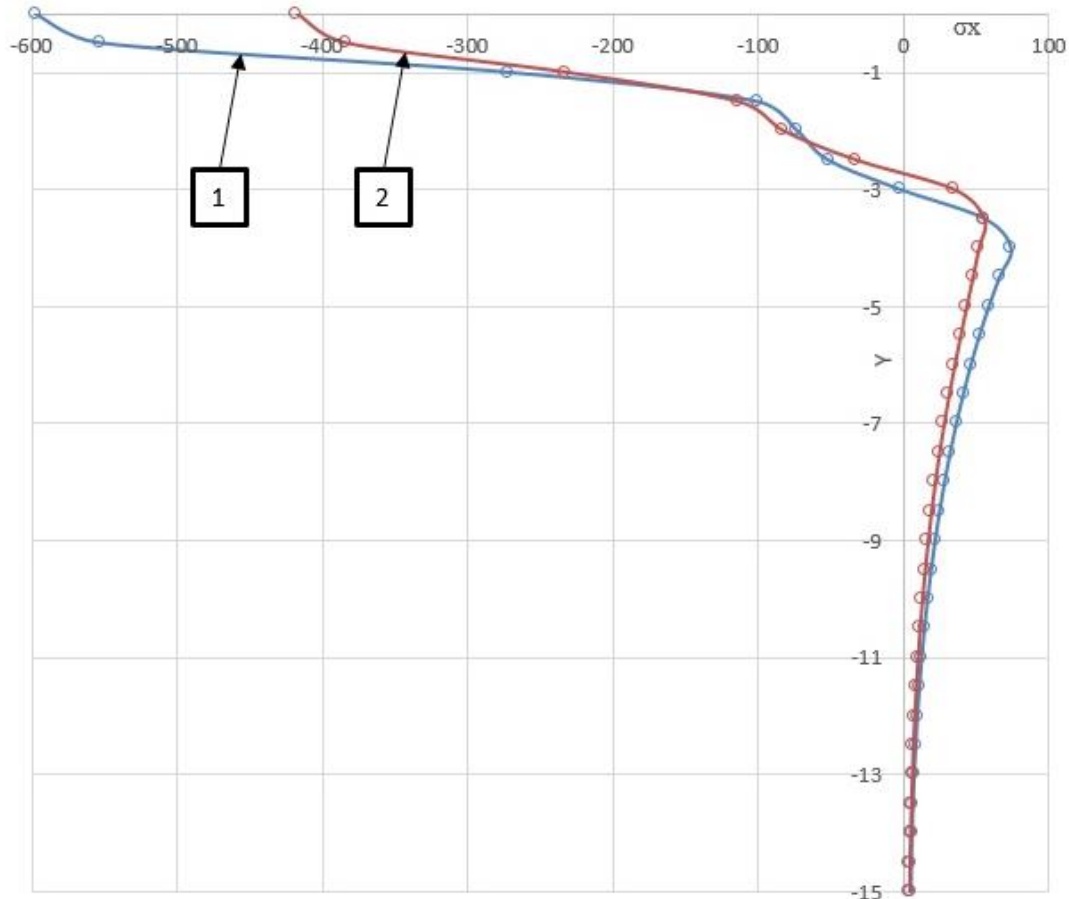


Рис. 8. Распределение тензора осевых остаточных напряжений  $\sigma_x$  по глубине поверхностного слоя после 300-го шага моделирования с учетом (1) и без учета (2) эффекта упрочняемого тела

Большие значения степени деформации сдвига  $A$  и степени исчерпания запаса пластичности (СИЗП)  $\Psi$  напротив имеет модель, не учитывающая ЭУТ (рис. 9). Максимальные значения на поверхности составляют  $A = 0,4$  и  $\Psi = 0,09$ , а для модели с упрочнением –  $A = 0,37$  и  $\Psi = 0,06$ .

Глубина распространения этих показателей имеет одинаковые значения как по значениям СИЗП ( $\Psi = 3,5$  мм), так и по СДС ( $A = 6$  мм) по обеим моделям.

Анализируя полученные результаты можно сделать предварительные вывод о том, что модель, учитывающая эффект упрочнения, с большей точностью описывает процессы, происходящие в реальном металле.

Остаточные напряжения, полученные с учетом ЭУТ, имеют большие значения, что объясняется как раз-таки учетом истории нагружения металла, повышения его предела текучести и снижения пластичности.

Накопленные значения степени деформации сдвига и степени исчерпания запаса пластичности, рассчитанные для обоих случаев по линейному критерию Колмогорова, при этом имеют меньшие значения.

По представленным показателям такая разница составляет примерно:  
- 39,5% для осевых остаточных напряжений;

- 8,1% для степени деформации сдвига;
- 50% для степени истощения запаса пластичности.

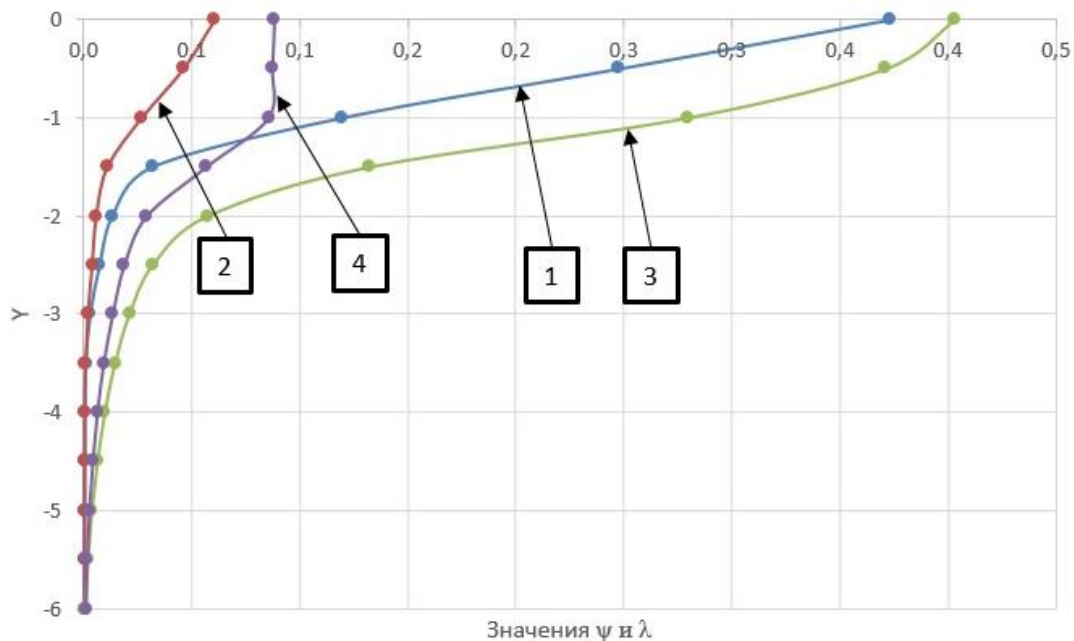


Рис. 9. Распределение накопленной степени деформации сдвига ( $\lambda$ ) с учетом (1) и без учета (2) эффекта упрочняемого тела и степени истощения запаса пластичности ( $\Psi$ ) с учетом (3) и без учета (4) эффекта упрочняемого тела по глубине поверхностного слоя после 300-го шага моделирования

В результате решения моделей с различными значениями основных режимов обработки – профильного радиуса ролика и действительного натяга выявлена тенденция изменения осевой составляющей тензора ОН (рис. 10-12). Остальные составляющие тензора характеризуются при этом значительно меньшими значениями.

Модели с натягом  $h_d = 0,03$  мм имеют максимум осевых сжимающих напряжений на поверхности детали ( $y = 0$  мм).

При увеличении действительного натяга наблюдается тенденция к увеличению максимальных значений сжимающих напряжений, однако этот экстремум смещается в глубину поверхностного слоя до значений примерно  $y = 0,5$  мм, приводя к формированию в тонком приповерхностном слое растягивающих ОН небольшой величины.

Глубина распространения сжимающих ОН  $h_{\sigma_x C}$  и глубина расположения второго (положительного) экстремума  $h_{\sigma_x D}$  увеличиваются с увеличением  $h_d$  и  $R_{np}$  (рис. 13), при этом при увеличении  $h_d$  от 0,05 мм до 0,07 мм увеличение глубины происходит более интенсивно.

Суммарная степень деформации сдвига  $\lambda \Sigma$  и степень истощения запаса пластичности  $\Psi \Sigma$  и глубина их распространения, а также значения этих же показателей, накопленные по шагам нагружения ( $\lambda_{нагр}$  и  $\Psi_{нагр}$ ), возрастают с увеличением действительного натяга и профильного радиуса ролика (рис. 14-16). При этом около 96% от суммарных значений СДС и СИЗП накапливается по циклам нагружения.

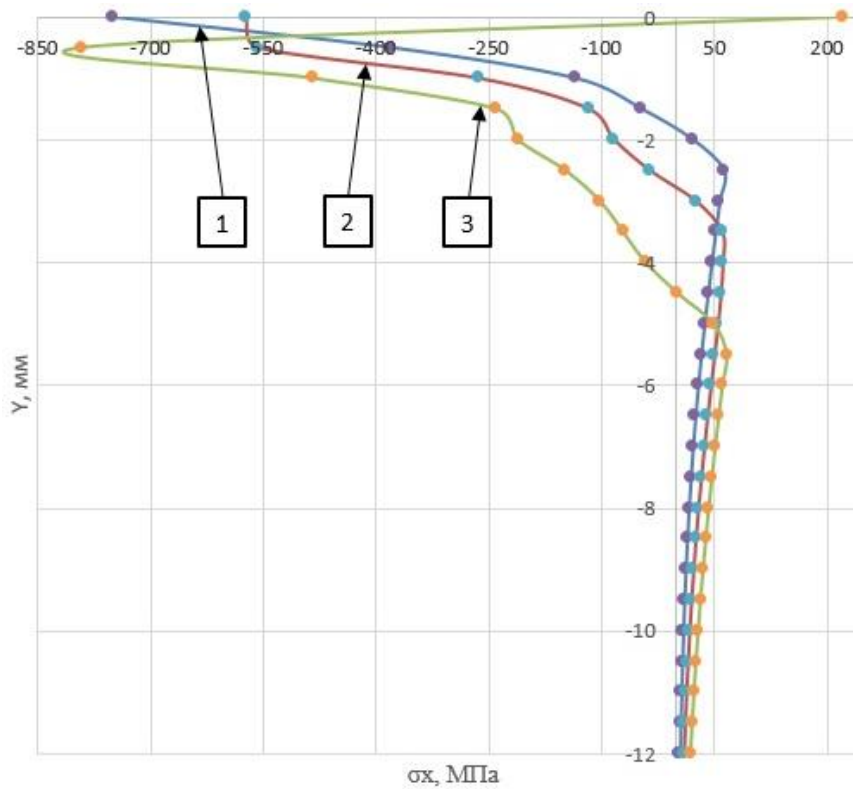


Рис. 10. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_x$  в моделях с профильным радиусом ролика  $R_{np} = 2$  мм при значениях действительного натяга ролика  $h_\delta = 0,03$  мм (1),  $h_\delta = 0,05$  мм (2),  $h_\delta = 0,07$  мм (3)

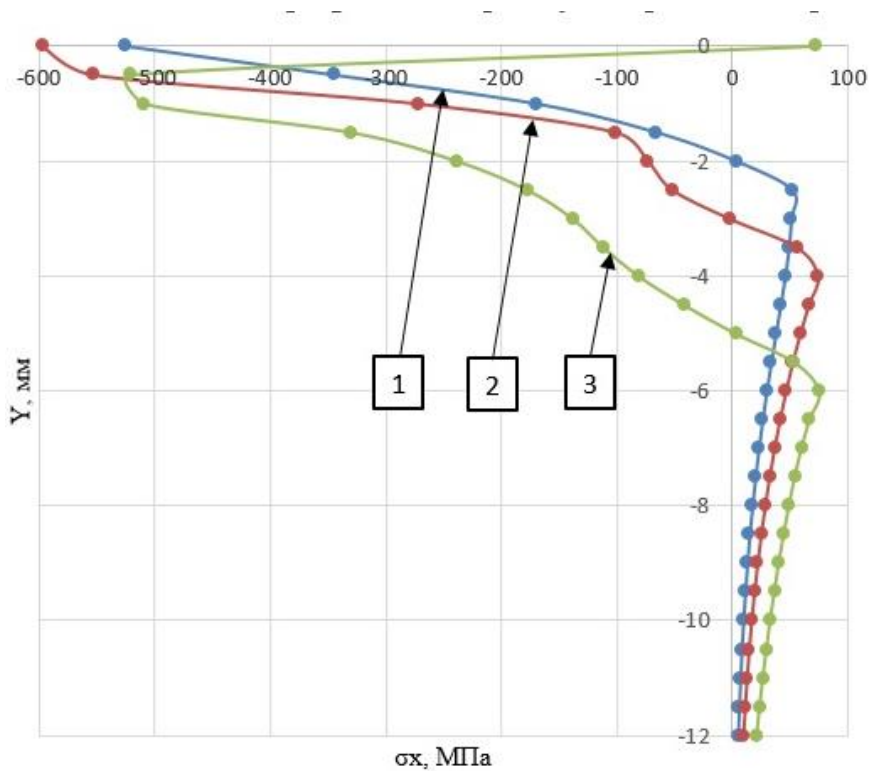


Рис. 11. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_x$  в моделях с профильным радиусом ролика  $R_{np} = 5$  мм при значениях действительного натяга ролика  $h_\delta = 0,03$  мм (1),  $h_\delta = 0,05$  мм (2),  $h_\delta = 0,07$  мм (3)

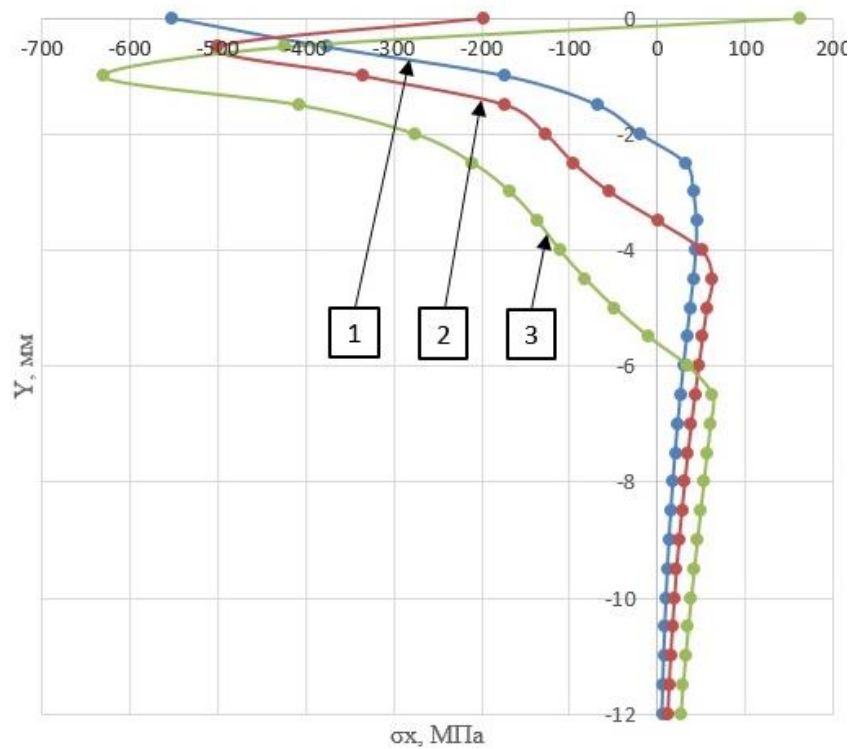


Рис. 12. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_x$  в моделях с профильным радиусом ролика  $R_{np} = 10$  мм при значениях действительного натяга ролика  $h_d = 0,03$  мм (1),  $h_d = 0,05$  мм (2),  $h_d = 0,07$  мм (3)

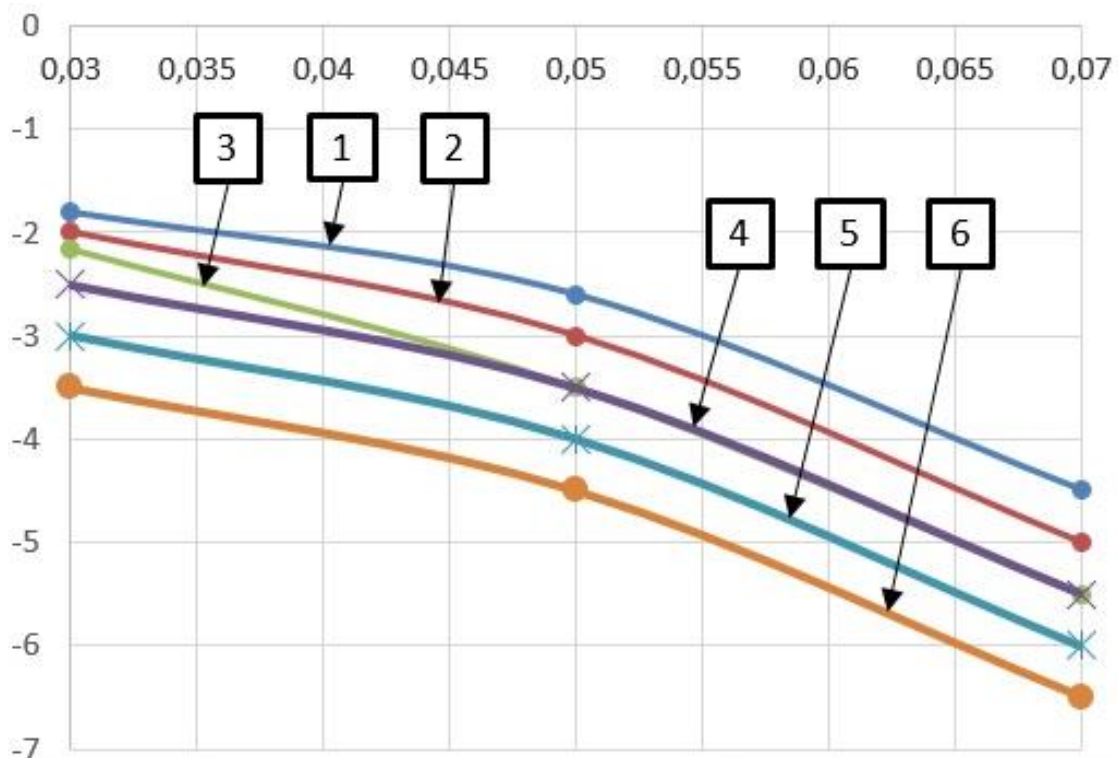


Рис. 13 Взаимосвязи глубины распространения осевых сжимающих ОН  $h\sigma_x C$  и глубины расположения второго (положительного) экстремума  $h\sigma_x D$  от  $h_d$ :

- 1)  $h\sigma_x C$  при  $R_{np} = 2$  мм; 2)  $h\sigma_x C$  при  $R_{np} = 5$  мм; 3)  $h\sigma_x C$  при  $R_{np} = 10$  мм;  
 4)  $h\sigma_x D$  при  $R_{np} = 2$  мм; 5)  $h\sigma_x D$  при  $R_{np} = 5$  мм; 6)  $h\sigma_x D$  при  $R_{np} = 10$  мм

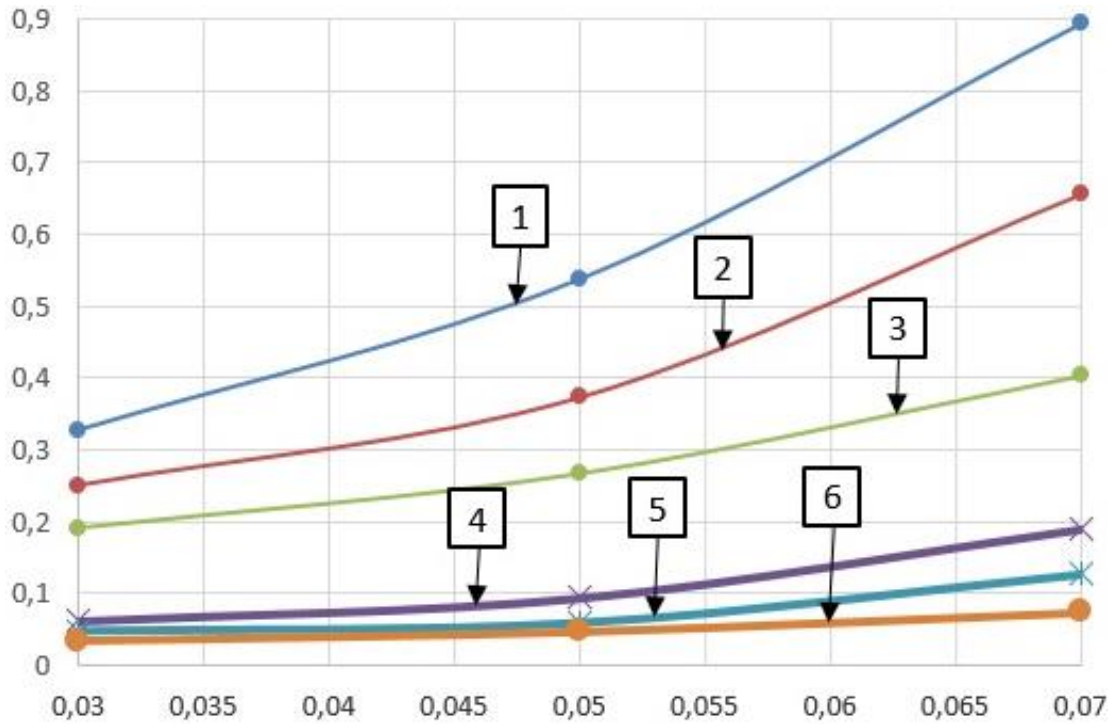


Рис. 14. Значения суммарной степени деформации сдвига ( $\Delta\Sigma$ ) и степени истощения запаса пластичности ( $\Psi\Sigma$ ) в зависимости от действительного натяга ролика  $h_d$ : 1)  $\Delta\Sigma$  при  $R_{np} = 2$  мм; 2)  $\Delta\Sigma$  при  $R_{np} = 5$  мм; 3)  $\Delta\Sigma$  при  $R_{np} = 10$  мм; 4)  $\Psi\Sigma$  при  $R_{np} = 2$  мм; 5)  $\Psi\Sigma$  при  $R_{np} = 5$  мм; 6)  $\Psi\Sigma$  при  $R_{np} = 10$  мм

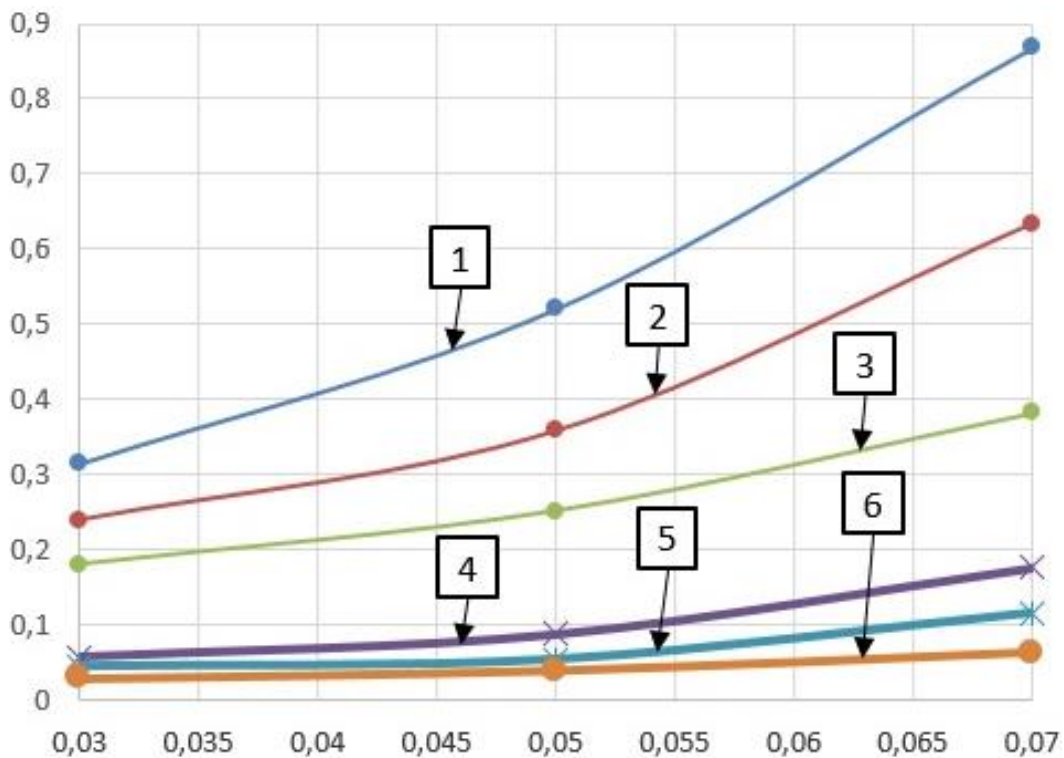


Рис. 15. Значения СДС ( $\Delta\Sigma_{нагр}$ ) и СИЗП ( $\Psi\Sigma_{нагр}$ ), накопленных по циклам нагружения, в зависимости от действительного натяга ролика  $h_d$ : 1)  $\Delta\Sigma_{нагр}$  при  $R_{np} = 2$  мм; 2)  $\Delta\Sigma_{нагр}$  при  $R_{np} = 5$  мм; 3)  $\Delta\Sigma_{нагр}$  при  $R_{np} = 10$  мм; 4)  $\Psi\Sigma_{нагр}$  при  $R_{np} = 2$  мм; 5)  $\Psi\Sigma_{нагр}$  при  $R_{np} = 5$  мм; 6)  $\Psi\Sigma_{нагр}$  при  $R_{np} = 10$  мм

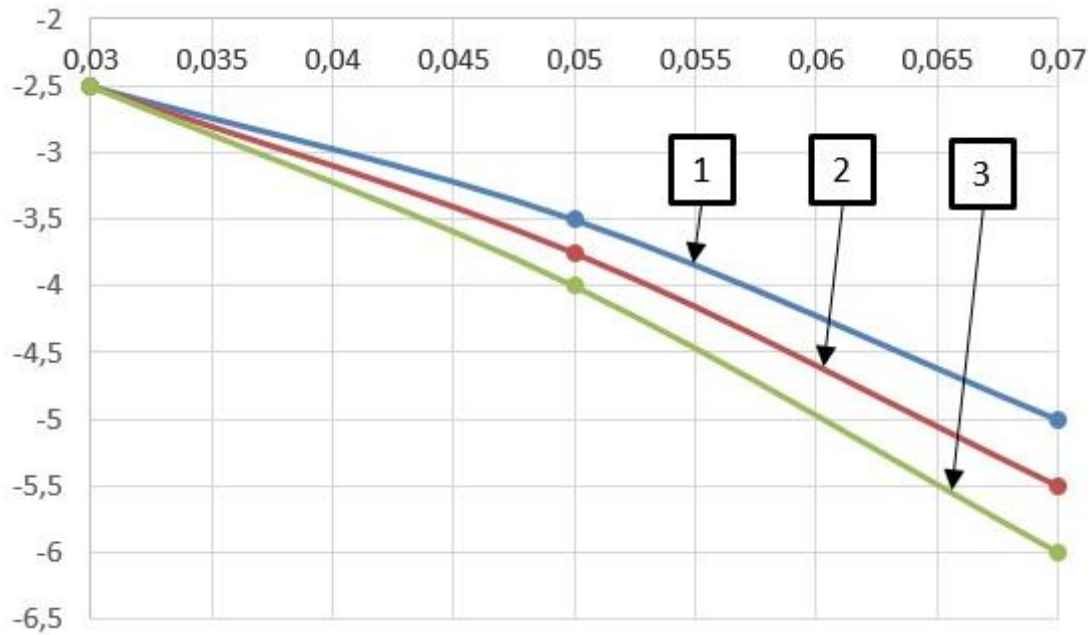


Рис. 16. Глубина распространения степени деформации сдвига (СДС)  $h\Delta$  и степени истощения запаса пластичности (СИЗП)  $h\Psi$  от действительного натяга ролика  $h_d$ : 1) при  $R_{np} = 2$  мм; 2) при  $R_{np} = 5$  мм; 3) при  $R_{np} = 10$  мм

Зависимости глубины распространения СДС и СИЗП от варьируемых параметров режима имеют схожий характер распределения. При натяге ролика  $h_d = 0,03$  мм значения глубины распространения для моделей с различными профильными радиусами ролика составляют 2,5 мм. При увеличении натяга до 0,07 мм диапазон глубины составляет 5..6 мм (рис. 16).

Минимальные значения показателя схемы напряженного состояния  $ПН_{min}$  увеличиваются с увеличением  $R_{np}$  и обнаруживают экстремум при значениях  $h_d$  около 0,05 мм (рис. 17).

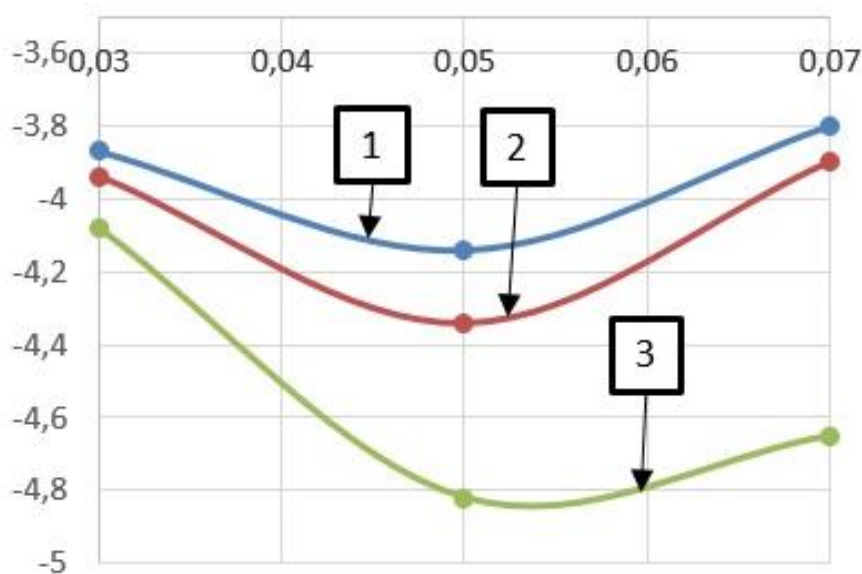


Рис. 17. Зависимость минимальных значений показателя схемы напряженного состояния  $ПН_{min}$  от действительного натяга ролика  $h_d$ : 1) при  $R_{np} = 2$  мм; 2) при  $R_{np} = 5$  мм; 3) при  $R_{np} = 10$  мм

### Список литературы:

1. Иванов, С. И. Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Пробл. прочности. - 1976. - №5. - С. 25-27.
2. Махалов, М.С. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий / М. С. Махалов, В.Ю. Блюменштейн // Вестник машиностроения. – М: Машиностроение, 2014. – №12. – С. 21-25.
3. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.: ил.
4. 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. –С. 18-26.
5. Овсеенко А. Н. Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами / А. Н. Овсеенко, М. М. Gajek, В. И. Серебряков. – Opole: PolitechnikaOpolska, 2001. – 228 с.
6. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.: ил.