



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела

Максим Махалов <sup>a, \*</sup>, Валерий Блюменштейн <sup>b</sup>

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва, ул. Весенняя, 28, г. Кемерово, 650000, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>,  [maxim\\_ste@mail.ru](mailto:maxim_ste@mail.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-3711-1535>,  [blumenstein@rambler.ru](mailto:blumenstein@rambler.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК621.787.4

#### История статьи:

Поступила: 08 августа 2018  
 Рецензирование: 21 августа 2018  
 Принята к печати: 22 октября 2018  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2018

#### Ключевые слова:

Остаточные напряжения  
 Механическое состояние металла  
 Технологическое наследование  
 Поверхностный слой  
 Упрочняющая обработка  
 Поверхностное пластическое деформирование

#### Благодарности

Авторы выражают признательность магистранту гр. КТМ-161 Худойназарову А.А., принявшему участие в проведении исследований.

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Механическое состояние металла, в частности степень деформации и остаточные напряжения (ОН) первого рода, в значительной степени определяет эксплуатационную долговечность изделий, особенно в условиях приложения знакопеременных нагрузок. Широкими возможностями по созданию благоприятного механического состояния металла обладают способы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). При этом точный расчет механического состояния при ППД не всегда представляется возможным, что сохраняет актуальность исследования и создания модельных представлений о формировании механического состояния и ОН на стадиях механической обработки при изготовлении металлических изделий. Отмечено, что метод конечных элементов (МКЭ) позволяет учитывать изменение механического состояния при многократном нагружении одного и того же микрообъема металла и получить более точные аналитические решения. **Цель работы:** развитие теоретических положений механики ППД на основе разработки модели упрочняемого упругопластического тела. В работе представлена конечно-элементная модель формирования механического состояния поверхностного слоя при упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД), учитывающая явление технологического наследования. **Результаты и обсуждение.** Выполнено моделирование и получены распределения параметров напряженно-деформированного состояния, а также рассчитаны параметры распределения механического состояния поверхностного слоя и остаточные напряжения, формируемые в процессе упрочняющей обработки ППД. Особенностью предложенной модели является учет явления технологического наследования и эффекта упрочняемого тела: наряду с учетом эволюции свойств металла, произошедшей на предшествующих операциях механической обработки, учитываются изменения свойств на текущей технологической операции. В предложенной модели учет эффекта упрочняемого тела реализован в виде схемы многократного нагружения-разгрузки металла детали по мере его продвижения через пространство очага деформации, что позволило с высокой точностью описать феноменологию процесса ППД. Представленные результаты подтверждают перспективность распространения изложенных модельных представлений на другие способы механической обработки и различные виды эксплуатационного нагружения упрочняемых ответственных изделий.

**Для цитирования:** Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 6–20. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-6-20.

## Введение

Механическое состояние металла, в частности степень деформации и остаточные напряжения (ОН) первого рода, в значительной степени определяет эксплуатационную долговечность

изделий, особенно в условиях приложения знакопеременных нагрузок. Широкими возможностями по созданию благоприятного механического состояния металла обладают способы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) [1–2]. При этом точный расчет механического состояния при ППД не всегда представляется возможным. Это связано с упрощением схем нагружения, неучетом эволюции свойств металла и др.

При моделировании механического состояния металла в процессах механической и

#### \*Адрес для переписки

Махалов Максим Сергеевич, к.т.н., доцент  
 Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва,  
 ул. Весенняя, 28,  
 650000, г. Кемерово, Россия  
 Тел.: +7-903-907-45-02, e-mail: [maxim\\_ste@mail.ru](mailto:maxim_ste@mail.ru)

упрочняющей обработки исследователями используются различные методы и подходы. Так, А.С. Букатый моделировал остаточные напряжения и деформации диска компрессора газотурбинного двигателя в процессе упрочнения ППД для оптимизации режимов упрочняющей обработки [3]. Зайдесом С.А. разработана численная модель напряженно-деформированного состояния в очаге деформации (ОД) и ОН в процессе охватывающего ППД [4]. Сидякин Ю.И. с соавторами провели математическое моделирование контактного взаимодействия индентора с обрабатываемым материалом при ППД, приняв в качестве расчетного критерия интенсивность контактной пластической деформации [5].

Большинство исследователей успешно используют метод конечных элементов (МКЭ), что позволяет достаточно качественно описать напряженно-деформированное состояние (НДС) металла и получить корректные инженерные решения. Кузнецов В.П. с соавторами смоделировали процесс выглаживания тонкого поверхностного слоя стального образца под внедряемым с постоянной силой и движущимся с постоянной скоростью индентором [6]. Liou J.J. и El-Wardany T.I. с помощью МКЭ воспроизвели процесс глубокой упрочняющей обкатки пластин из титана [8].

Авторы работ [9–12] моделировали процесс упрочнения шариковым и роликовым инструментом как в 2D-, так и в 3D-постановке. Установлено, что деформации и остаточные напряжения имеют высокую сходимость с экспериментальными данными, полученными из литературных источников. Ряд авторов успешно использовали МКЭ для моделирования НДС при лезвийных методах обработки: резанием, фрезерованием и другими методами в различных постановках [13–20]. Используемые 2D- и 3D- постановки учитывали как силовое воздействие, так и возникающие тепловые потоки при различных варьируемых параметрах режима обработки.

Ивлев Д.Д. развивает математический аппарат теории несжимаемого идеального изотропного жесткопластического тела в направлении учета упрочнения пластического материала, решая задачу для случая плоской деформации [21].

В работах А.Л. Воронцова с соавторами представлена математическая модель, учитывающая

эффект упрочняемого тела для процесса вдавливания осесимметричного пуансона в поверхность тела больших размеров [22–23]. Показано, что принципиально невозможно надежно определить прочностные свойства материала с помощью измерения твердости, поскольку разные металлы проявляют различную степень упрочнения при одинаковой величине пластической деформации.

Авторы отмечают, что аппарат МКЭ позволяет учитывать изменение механического состояния при многократном нагружении одного и того же микрообъема металла и получить более точные аналитические решения. Это может быть достигнуто путем разработки модели кривой течения, модели многократного нагружения и качественного описания кинематики пластического течения металла в очаге деформации.

*Цель работы:* развитие теоретических положений механики ППД на основе разработки модели упрочняемого упругопластического тела.

*Задачи исследований:* разработка схемы многократного нагружения-разгрузки металла детали, максимально учитывающей феноменологию процесса ППД; моделирование процесса ППД на основе аппарата механики ТН с учетом эффекта упрочняемого тела.

## Теория

В работе использована базовая модель процесса ППД, разработанная В.М. Смелянским с помощью методов линий скольжения и визиопластичности. Автором проведено моделирование НДС очага деформации (ОД) и выявлены закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин в процессах ППД обкатыванием и выглаживанием [1].

Согласно данной модели при обработке ППД в зоне контакта деформирующего инструмента с деталью возникает асимметричный очаг деформации, форма и размеры которого зависят от технологических факторов (рис. 1). Движение частиц металла осуществляется вдоль линий тока, эквидистантных профилю очага деформации и определяемых из решения задач механики. Начальные параметры состояния, которые частицы металла имели до входа в очаг деформации (линия  $AG$ ), трансформируются в накопленные к моменту их выхода из ОД (линия  $GF$ )

и формируют ПС детали. Проведены численное моделирование, расчеты накопленной степени деформации сдвига и степени исчерпания запаса пластичности [24–25].

Особенностью разработанной модели механики ППД является учет эффекта упрочняемого тела по мере продвижения частиц металла через пространство очага деформации. В жесткопластической постановке моделировалось пластическое течение металла при единичном (за один оборот) воздействии инструмента на меридиональное сечение детали. Наряду с исходными свойствами металла в качестве исходных данных использовался профиль ОД как функция от параметров режима обработки [25].

Блюменштейном В.Ю. представленная модель была развита в направлении учета технологического наследования (ТН) в процессах обработки резанием, ППД и эксплуатационного усталостного нагружения [26, 27].

На этой основе авторами этих работ разработана конечно-элементная модель формирования механического состояния при ППД роликовым

инструментом, учитывающая трансформацию свойств металла в ОД (эффект упрочняемого тела).

При создании модели были приняты следующие условия и допущения.

1. Моделируемый металл считался изотропным с параметрами, соответствующими механическим параметрам стали 45 (ГОСТ 1050-88) в состоянии поставки (табл. 1).
2. Ввиду малого нагрева при обработке ППД возникающие деформации имели только механическую природу.
3. Использованная билинейная аппроксимация кривой течения учитывала упрочнение металла (табл. 1 и рис. 2).
4. Ввиду относительно невысокой величины возникающей погрешности для упрощения расчетов 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 [28].
6. Возможные краевые эффекты вносят в результаты моделирования весьма незначительную

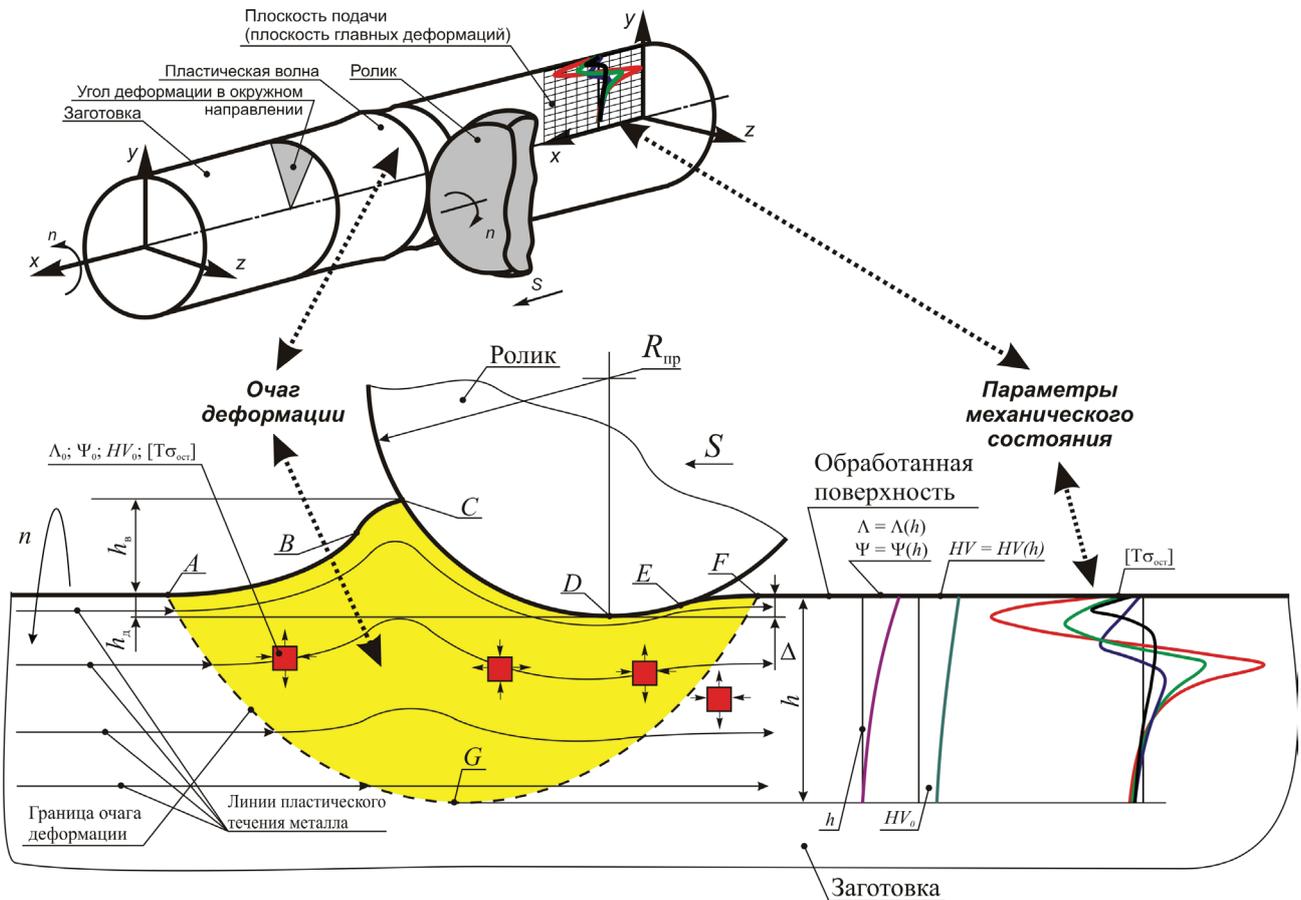


Рис. 1. Схема очага деформации в плоскости подачи при обработке ППД  
 Fig. 1. Scheme of the deformation zone in the feed plane when SPD treatment

Значения параметров физических и механических свойств металла  
Physical and mechanical metal properties

Параметр / Parameter	Единица измерения / Unit	Значение / Value
Модуль упругости / Young modulus	$E$ , МПа / $E$ , МПа	$2 \cdot 10^5$
Плотность / Density	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> / $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	7800
Коэффициент Пуассона / Poisson ratio	$\nu$	0,3
Коэффициент трения / Friction ratio	$\eta$	0,21
Экстраполированный предел текучести / Extrapolated yield strength	$\sigma_{эТ}$ , МПа / $\sigma_{es}$ , МПа	366
Тангенциальный модуль / Tangential module	$T_{mod}$ , МПа / $T_{mod}$ , МПа	2596

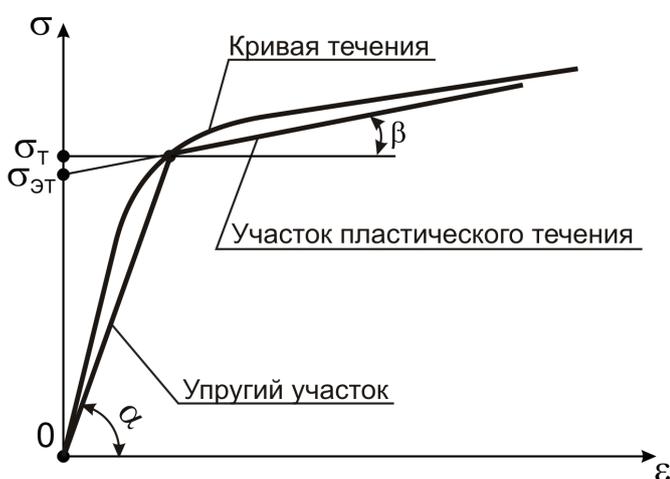


Рис. 2. График билинейной аппроксимации кривой течения

Fig. 2. Metal flow curve bilinear approximation diagram

погрешность, поскольку размеры возникающего при обработке очага деформации значительно меньше моделируемого фрагмента.

7. Обкатной ролик заданного профильного радиуса моделировался как абсолютно жесткая окружность, поскольку многочисленными исследованиями доказано, что при обработке ППД деформирующие инструменты подвергаются весьма малому износу, при этом каких-либо значимых деформаций роликов или шариков не фиксируется.

На основании результатов исследований процессов ППД, представленных в работе [25], была использована плоскодеформированная постановка: процесс моделировался в плоскости подачи, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки. В рассматриваемой

модели использовались следующие значения основных параметров режима обработки: профильный радиус  $R_{пр} = 5$  мм, заданный натяг  $h_3 = 0,05$  мм, подача  $S = 0,1$  мм/об; в дальнейшем диапазон варьирования составил:  $R_{пр} = 2..10$  мм,  $h_3 = 0,03..0,07$  мм.

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали длиной  $L = 50$  мм и высотой  $h = 20$  мм, нижняя и боковые границы которой жестко закреплялись по обеим осям (рис. 3).

Для разбиения модели на конечные элементы использовался плоский четырехузловой элемент Visco106, поддерживающий большие значения упругопластических деформаций (рис. 4) [29]. Для удобства дальнейших расчетов на модели обрабатываемой детали генерировалась сетка квадратных элементов размером 0,5 мм.

При моделировании контактной пары (Contact pair) был выбран тип контакта «поверхность-поверхность» (Surface to surface), в качестве контактного алгоритма – расширенный метод Лагранжа (Augmented Lagrange method). Важным параметром в настройках контактной пары является значение допуска взаимного проникновения моделируемых тел друг в друга (Penetration tolerance), значения которого могут задаваться как постоянные (constant) величины и как функции (factor) от размеров элемента. С некоторой долей погрешности с помощью этого параметра можно моделировать величину упругого отжатия инструмента от обрабатываемой поверхности. В представленной работе для значений заданного натяга  $h_3 = 0,05$  мм было

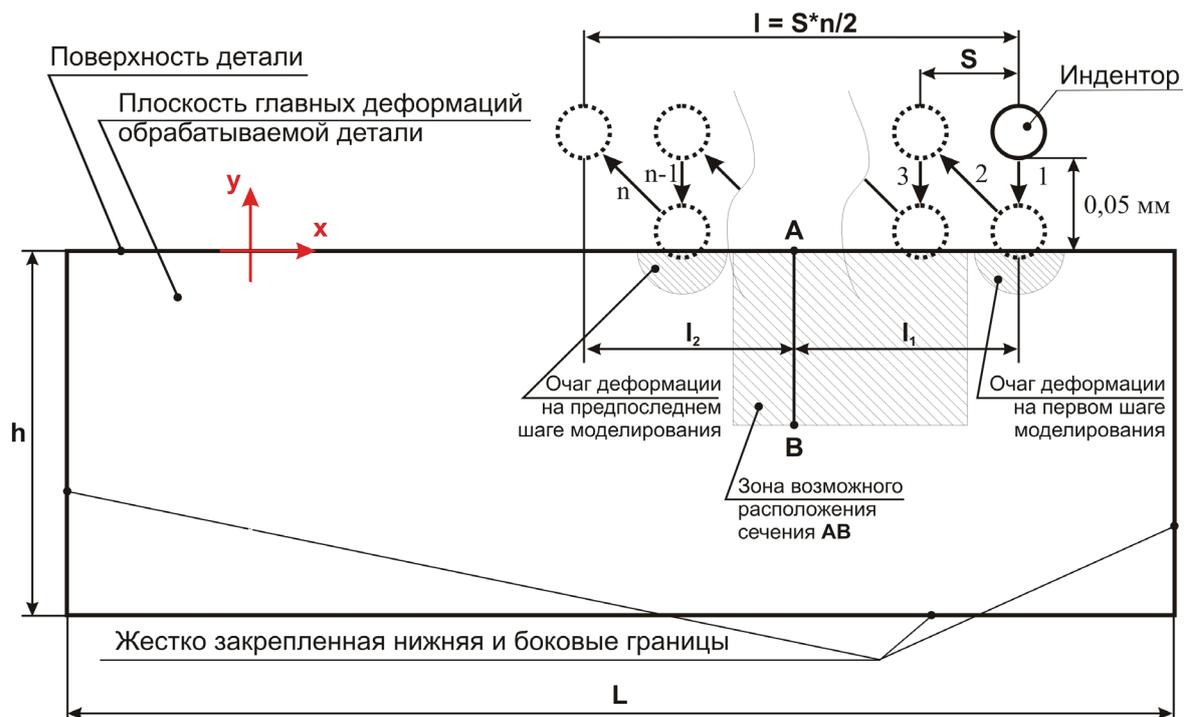


Рис. 3. Схема к постановке задачи моделирования процесса обработки СПД:

$L, h$  – размеры моделируемого фрагмента;  $l_1$  – расстояние от исходного положения индентора до сечения  $AB$  в горизонтальном направлении;  $l_2$  – расстояние от конечного положения индентора до сечения  $AB$  в горизонтальном направлении;  $n$  – число шагов моделирования;  $S$  – подача;  $l$  – величина перемещения индентора вдоль обрабатываемой поверхности

Fig. 3. SPD treatment process modeling scheme:

$L, h$  – simulated fragment size;  $l_1$  – distance from the indenter initial position to the section  $AB$  in the horizontal direction;  $l_2$  – distance from the indenter end position to the section  $AB$  in horizontal direction;  $n$  – the number of simulation steps;  $S$  – feed;  $l$  – along the workpiece indenter displacement length

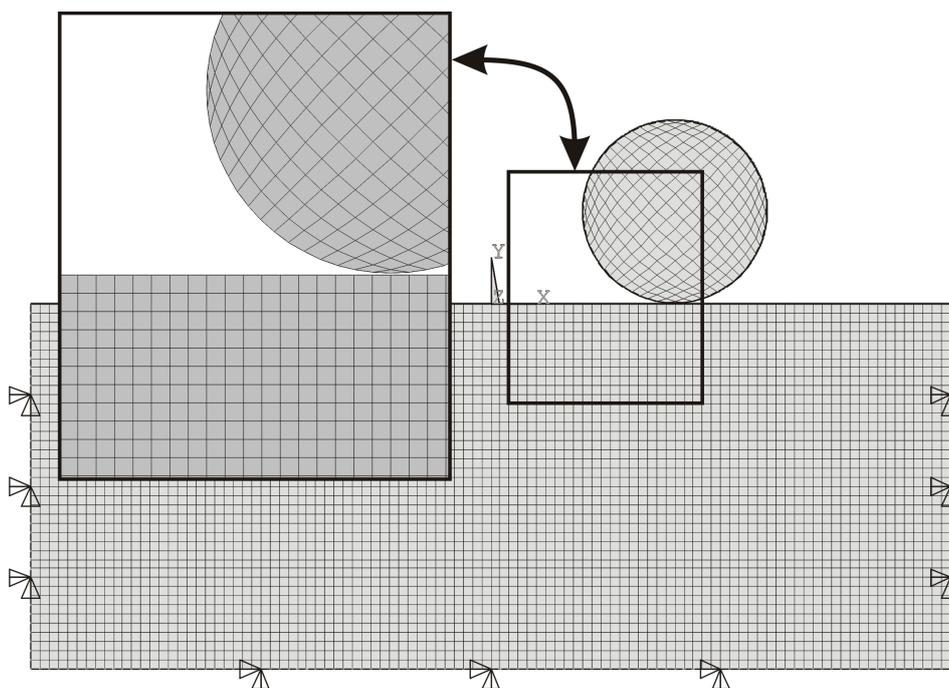


Рис. 4. Схема разбиения модели на конечные элементы

Fig. 4. Finite element model meshing scheme

выбрано значение Penetration tolerance, равное 0,05 (factor).

В плоскости главных деформаций (см. рис. 1) перемещение очага деформации дискретно: новый возникает со смещением от предыдущего на величину выбранной подачи  $S = 0,1$  мм/об.

Учет этого обстоятельства является новизной модели и позволяет определять деформационные параметры и остаточные напряжения с учетом эффекта упрочняемого тела.

В исходном положении индентор располагался относительно поверхности с зазором 0,05 мм. На первом и всех последующих нечетных шагах моделирования осуществлялось нагружение – индентор смещался в направлении поверхности на величину, предполагающую внедрение и создание заданного натяга. На втором и всех последующих четных шагах моделирования осуществлялась разгрузка – индентор отводился от поверхности на исходное расстояние с одновременным перемещением вдоль поверхности на величину подачи.

Для рассматриваемой модели было реализовано 300 шагов (150 – нагружение, 150 – разгрузка). При этом с учетом принятой величины подачи длина обработанной траектории составила  $l = S \cdot n / 2 = 15$  мм.

Основная идея моделирования заключалась в том, что некоторое сечение моделируемого фрагмента (отрезок  $AB$ , рис. 3) расположено таким образом, что при первом нагружении оно еще не находится, а при последнем – уже покинуло пространство ОД. Так, в рассматриваемой модели расстояние от такого сечения в направлении подачи до исходного и до конечного положения индентора составило соответственно  $l_1 = 5$  мм и  $l_2 = 10$  мм (рис. 3).

Определение положения  $AB$  для каждой модели осуществлялось отдельно исходя из следующих соображений (см. рис. 3):

– сечение должно находиться в направлении движения подачи относительно стартового положения индентора;

– модель должна иметь достаточное количество шагов нагружения, т. е. имитировать достаточное количество оборотов детали и длину обработанной поверхности для появления зоны возможного расположения отрезка  $AB$ ;

– на первом шаге моделирования (внедрение индентора) значения всех компонентов пласти-

ческой деформации в предполагаемой зоне расположения должны быть нулевыми или пренебрежимо малыми;

– значения показателя схемы напряженного состояния на первом (нагружение) и втором (разгрузка) (как и на предпоследнем и последнем) шагах моделирования в выбранном сечении должны быть примерно равными, что говорит о том, что рассматриваемое сечение еще не вошло (или уже покинуло) в пространство ОД.

Как показали результаты предварительного моделирования, выбор расположения рассматриваемого сечения внутри выделенной на рис. 3 зоны не играет значительной роли, так как в пределах этой зоны основные параметры напряженно-деформированного состояния изменяются незначительно.

Таким образом, в процессе реализации всех шагов моделирования выбранный отрезок через пространство ОД и является моделью именно того сечения по глубине обработанного ПС, в котором произошло накопление деформаций, частичное исчерпание запаса пластичности и формирование тензора ОН, которые могут быть определены с учетом изменяющихся свойств металла. На рис. 5 в качестве примера представлено распределение компонентов пластической деформации после первого и 299-го шагов нагружения.

## Результаты и обсуждение

После решения модели в выделенном сечении  $AB$  для каждого шага моделирования фиксировались следующие значения: координаты узлов, составляющие вектора смещений узлов, компоненты тензора упругой, пластической и суммарной упругопластической деформации, а также компоненты тензора напряжений: напряжений под нагрузкой для нечетных шагов моделирования (шагов нагружения), промежуточных остаточных напряжений для четных шагов моделирования (шагов разгрузки) и итоговых остаточных напряжений для последнего четного шага моделирования, когда рассматриваемое сечение покинуло пространство очага деформации.

Рассмотрим подробнее значения компонентов напряженно-деформированного состояния на двух последних шагах моделирования: шаг 299 (нагружение) и шаг 300 (разгрузка) (рис. 6 и табл. 2).

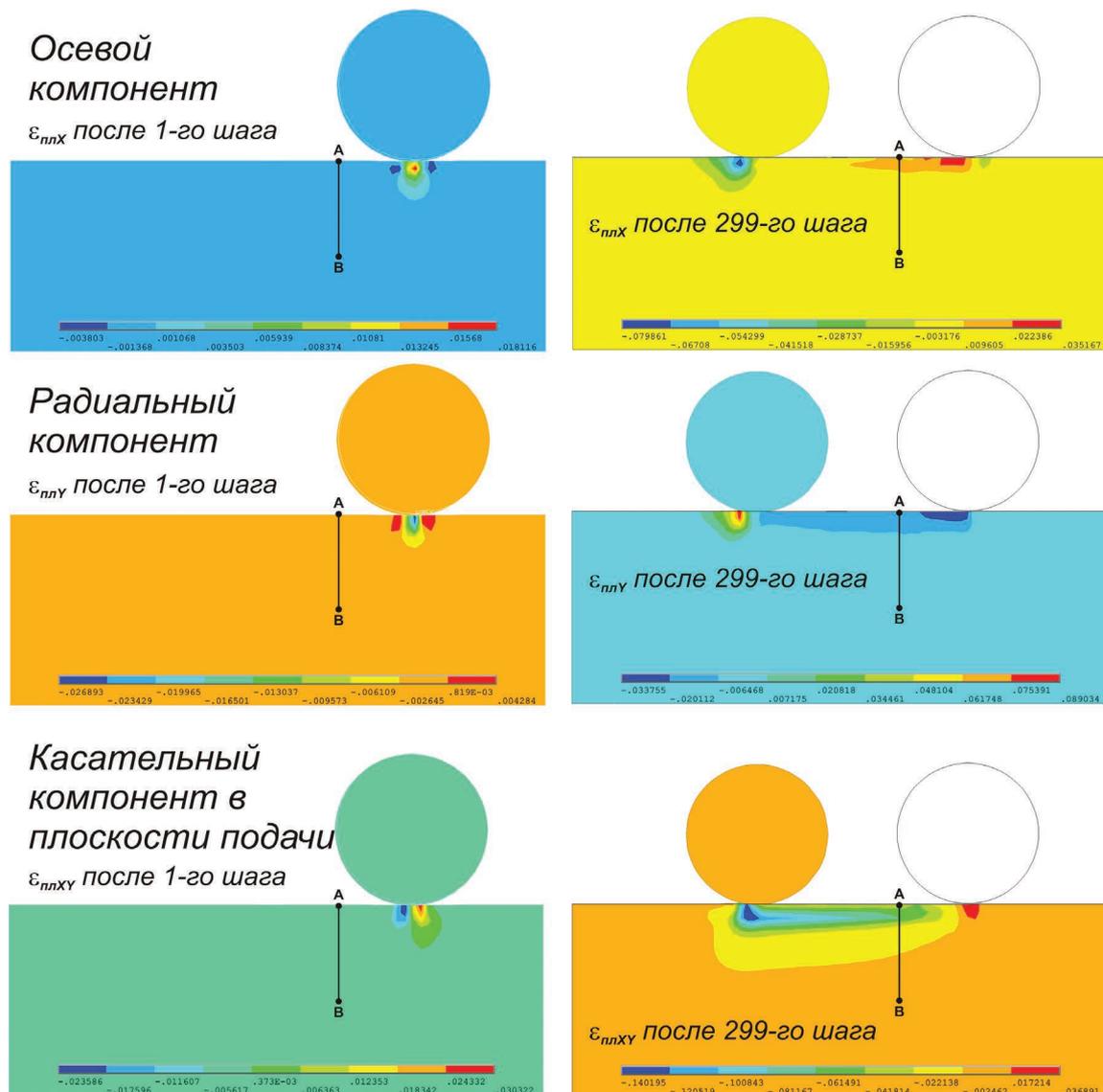


Рис. 5. Распределение компонентов тензора пластической деформации после первого и 299-го шагов моделирования

Fig. 5. Plastic strain tensor components distribution after 1-st and 299-th modeling step

На рис. 6 представлены распределения компонентов тензора напряжений. Осевой компонент под нагрузкой изменяется в диапазоне  $-1150 \dots 400$  МПа, а в цикле разгрузки (осевые ОН) в диапазоне  $-680 \dots 480$  МПа, при этом в обоих случаях на всем протяжении обработанной поверхности наблюдается слой со сжимающими остаточными напряжениями до  $-680$  МПа.

Радиальный компонент под нагрузкой также изменяется в значительном диапазоне  $-1920 \dots 100$  МПа, в то время как в цикле разгрузки наблюдаются небольшие сжимающие и растягивающие напряжения  $-170 \dots 150$  МПа. В результате на обработанной поверхности формируются растягивающие ОН небольшой величины (до 100 МПа).

В соответствии с принятой постановкой моделирования окружной компонент представляет собой полусумму осевого и радиального и отражает соответственно тенденцию их совместного распределения.

Касательный компонент в моделируемой плоскости на этапе нагружения характеризуется диапазоном значений  $-300 \dots 460$  МПа, при этом в передней зоне очага деформации наблюдаются отрицательные, а в задней зоне положительные значения. На этапе разгрузки касательные напряжения имеют примерно равные значения обоих знаков ( $-180 \dots 200$  МПа), которые в среднем в два раза ниже значений в цикле нагружения. При этом не наблюдается каких-либо существенных

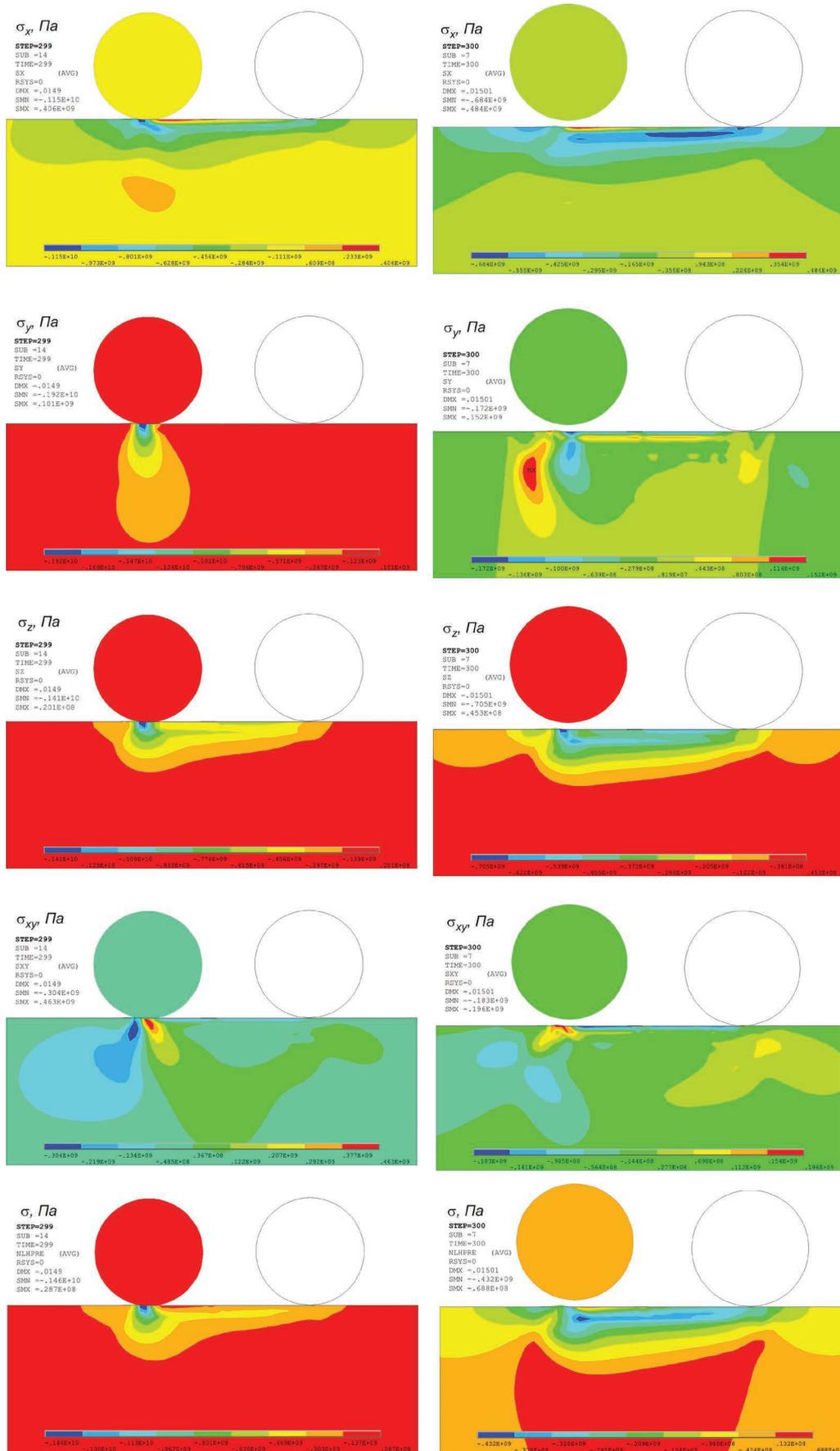


Рис. 6. Распределение компонентов тензора напряжений после 299-го и 300-го шагов моделирования

Fig. 6. Stress tensor components distribution after 299-th and 300-th modeling step

**Максимальные и минимальные значения компонентов тензора общей и пластической деформации**  
**The maximum and minimum values of the components of the total tensor and plastic deformation**

Шаг моделирования / Modeling step		299		300	
Компонент / Component		Min, %	Max, %	Min, %	Max, %
Осевой / axial	$\varepsilon_X$	-8,17	3,34	-8,06	3,33
	$\varepsilon_{плX} / \varepsilon_{plX}$	-8	3,52	-8	3,52
Радиальный / radial	$\varepsilon_Y$	-3,25	8,88	-3,25	8,95
	$\varepsilon_{плY} / \varepsilon_{plY}$	-3,38	8,91	-3,38	8,86
Касательный в плоскости подачи / shear in the feed plane	$\varepsilon_{XY}$	-14,21	3,69	-13,93	3,69
	$\varepsilon_{плXY} / \varepsilon_{plXY}$	-14,02	3,69	-14,02	3,69

значений этого компонента по глубине обработанного поверхностного слоя.

Среднее нормальное напряжение (инвариантная величина, математически равная среднему арифметическому нормальных или главных напряжений) изменяется в диапазонах  $-1460 \dots 30$  МПа и  $-430 \dots 70$  МПа соответственно на предпоследнем и последнем шагах моделирования. Представленная картина позволяет сделать вывод о том, что в целом большая часть пространства очага деформации, как и полученный в результате обработки поверхностный слой, находятся преимущественно в состоянии сжатия.

Для анализа возникающих деформаций сведен в табл. 2 максимальные и минимальные значения всех составляющих и выразим их в процентах.

В использованной постановке общая деформация представляет собой сумму упругих и пластических деформаций, однако учитывая, что на 300-м шаге моделирования происходит разгрузка, общая деформация на этом шаге представляет собой только необратимую пластическую составляющую.

На 299-м шаге осевой компонент общей деформации варьируется в диапазоне  $-0,0817 \dots 0,0334$ , а на 300-м в диапазоне  $-0,0806 \dots 0,0333$ . При этом деформация сжатия наблюдается преимущественно в передней части пространства очага деформации, а деформа-

ция растяжения локализована на обработанной поверхности и практически идентична для обоих шагов моделирования (абсолютную разность значений в 0,01 % можно считать пренебрежимо малой погрешностью моделирования). Абсолютная разность значений в передней зоне очага деформации 0,11 %.

Радиальный компонент общей деформации на обоих шагах имеет качественно и количественно схожий, однако противоположный с осевым по знаку характер распределения по пространству модели: деформация растяжения наблюдается в передней части очага деформации, деформация сжатия – в области обработанной поверхности.

На 299-м шаге радиальный компонент варьируется в диапазоне  $-0,0325 \dots 0,0888$ , а на 300-м в диапазоне  $-0,0324 \dots 0,0895$ . Абсолютная разность значений аналогично, как и для осевых деформаций, составляет 0,01 % для обработанной поверхности и 0,07 % – для передней части очага деформации.

Диапазоны варьирования общей деформации сдвига (касательного компонента) составляют для 299-го шага  $-0,1420 \dots 0,0368$ , для 300-го шага  $-0,1392 \dots 0,0368$ . При этом максимальные положительные значения идентичны для обоих шагов и наблюдаются в стартовой зоне вблизи исходного положения индентора.

Анализ показывает практически одинаковый характер распределения как на 299-м, так и на 300-м шагах моделирования, что позволяет

сделать вывод о том, что большая часть общей деформации сдвига является результатом не последнего шага, а всего процесса нагружения. Наибольшие отрицательные значения наблюдаются в зоне очага деформации, при этом в цикле нагружения их величина больше на 0,28 % (0,0028).

Причиной наблюдаемой для всех компонентов разницы значений в зоне очага деформации ( $\varepsilon_x - 0,11\%$ ,  $\varepsilon_y - 0,07\%$ ,  $\varepsilon_{xy} - 0,28\%$ ) является упругопластическая деформация, полученная моделью на предпоследнем (299-м) шаге моделирования.

Осевой компонент пластической деформации (табл. 2) имеет идентичное распределение на обоих шагах моделирования, при этом разность значений со значениями общей деформации составляет:

- для 299-го шага: 0,17 % – для деформации сжатия, 0,18 % – для деформации растяжения;
- для 300-го шага: 0,06 % – для деформации сжатия, 0,19 % – для деформации растяжения.

По мнению авторов, разница в значениях 0,17...0,19 % представляет собой упругую составляющую общей деформации, в то время как полученная для деформации сжатия на 300-м шаге разность в 0,06 % представляет собой сумму упругой и вторичной пластической деформации в передней зоне очага деформации.

Радиальный компонент имеет неидентичное распределение в зоне очага деформации на различных шагах моделирования, разница составляет 0,05 %, что, вероятно, вызвано наличием вторичной пластической деформации в этом направлении. Разность значений в 0,13 % для обоих шагов в зоне обработанной поверхности также представляет собой упругую составляющую общей деформации.

Касательный компонент пластической деформации имеет идентичный с общей деформацией характер распределения, отличаются на величину 0,28 % лишь максимальные отрицательные значения, наблюдаемые при нагружении (шаг 299) в зоне очага деформации, что, вероятно, вызвано совместным действием упругой и вторичной пластической деформации.

Полученные результаты моделирования в дальнейшем были использованы для расчетов параметров упрочнения и остаточных напряжений.

## Выводы

1. Выполнено моделирование процесса ППД на основе аппарата механики ТН с учетом эффекта упрочняемого тела. Получены распределения параметров напряженно-деформированного, а также рассчитаны параметры механического состояния поверхностного слоя и остаточные напряжения, формируемые в процессе упрочняющей обработки ППД.

2. Особенностью предложенной модели является учет явления технологического наследования, дополненный учетом эффекта упрочняемого тела: наряду с учетом эволюции свойств металла, произошедшей на предшествующих операциях механической обработки, учитываются изменения свойств на текущей технологической операции.

3. В предложенной модели учет эффекта упрочняемого тела реализован в виде схемы многократного нагружения-разгрузки металла детали по мере его продвижения через пространство очага деформации, что позволяет с высокой точностью описать феноменологию процесса ППД.

4. Для оценки доли влияния эффекта упрочняемого тела в дальнейшем с использованием предложенного подхода проведено построение аналогичных моделей с измененной формой кривой течения металла, исключаяющей учет эффекта упрочнения.

5. Для уточнения известных и выявления новых закономерностей влияния на параметры механического состояния разработана серия КЭ-моделей с варьируемыми параметрами режима обработки ППД.

6. С целью повышения эффективности прогнозирования ресурса целесообразно распространение изложенных модельных представлений на другие способы механической обработки и различные виды эксплуатационного нагружения упрочняемых ответственных изделий.

## Список литературы

1. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. В 2 т. Т. 1 / А.Г. Суслов, В.Ю. Блюменштейн, Р.В. Гуров, А.Н. Исаев, Л.Г. Одинцов, В.В. Плешаков, В.В. Федоров, Ю.Г. Шнейдер; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.:

Машиностроение, 2014. – 480 с. – ISBN 978-5-94275-710-6.

2. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. В 2 т. Т. 2. / А.Г. Суслов, А.П. Бабичев, А.В. Киричек, А.В. Овсенко, П.Д. Мотренко, С.К. Амбросимов, А.И. Афонин, Р.В. Гуров, А.Н. Прокофьев, Д.А. Соловьев; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 444 с. – ISBN 978-5-94275-711-3.

3. Букатый С.А., Кондратов А.П., Букатый А.С. Прогнозирование технологических остаточных деформаций тонкостенных дисков после упрочнения методом поверхностного пластического деформирования // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов Международной научно-технической конференции, 21–23 июня 2006 г. – Самара: СГАУ, 2006. – В 2-х Ч. Ч.1. – С. 183–184.

4. Деформирующая обработка валов: монография / С.А. Зайдес, В.Н. Емельянов, М.Е. Попов, Е.Ю. Кропоткина, А.С. Бубнов; под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 452 с. – ISBN 978-508038-0869-5.

5. Сидякин Ю.И., Трунин А.В., Шевцов А.Н. Сферическая модель исследования контактной упругопластической деформации // Известия ВолгГТУ. – 2010. – № 12 (72). – С. 48–52. – (Серия: Прогрессивные технологии в машиностроении; вып. 6).

6. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г. Математическое моделирование нелинейной динамики процесса упругого выглаживания поверхностей деталей // Вестник машиностроения. – 2008. – № 12. – С. 61–65.

7. Wang W.W., Jia B.B., Yu J.B. A new flexible sheet metal forming method and its stamping process. The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, October 25–30, 2015. – Taipei, 2015.

8. Liou J.J., El-Wardany T.I. Finite element analysis of residual stress in Ti-6Al-4V alloy plate induced by deep rolling process under complex roller path // International Journal of Manufacturing Engineering. – 2014. – Art. 786354. – doi: 10.1155/2014/786354.

9. Sayahi M., Sghaier S., Belhadjsalah H. Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 67 (5). – P. 1665–1673. – doi: 10.1007/s00170-012-4599-9.

10. Introduction of enhanced compressive residual stress profiles in aerospace components using combined mechanical surface treatments / A. Gopinath, A. Lim, B. Nagarajan, C.C. Wong, R. Maiti, S. Castagne // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Iss. 157 (1). – P. 012013. – doi: 10.1088/1757-899X/157/1/012013.

11. Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process // Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 54 (1). – P. 237–240.

12. Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses / P. Sartkulvanich, T. Altan, F. Jasso, C. Rodriguez // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2007. – Vol. 129. – doi: 10.1115/1.2738121.

13. Huang X., Sun J., Li J. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 77. – P. 1035–1041. – doi: 10.1007/s00170-014-6533-9.

14. Ji X., Zhang X., Liang S. Predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 70. – P. 2159–2168. – doi: 10.1007/s00170-013-5439-2.

15. Modeling of residual stresses in milling / J.-C. Su, K.A. Young, K. Ma, S. Srivatsa, J.B. Morehouse, S.Y. Liang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65. – P. 717–733. – doi: 10.1007/s00170-012-4211-3.

16. An approach for analyzing and controlling residual stress generation during high-speed circular milling / X. Jiang, B. Li, J. Yang, X.Y. Zuo, K. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 66. – P. 1439–1448. – doi: 10.1007/s00170-012-4421-8.

17. Effects of tool diameters on the residual stress and distortion induced by milling of thin-walled part / X. Jiang, B. Li, J. Yang, X.Y. Zuo // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 68. – P. 175–186. – doi: 10.1007/s00170-012-4717-8.

18. Chen J., Fang Q., Zhang L. Investigate on distribution and scatter of surface residual stress in ultra-high speed grinding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 75. – P. 615–627. – doi: 10.1007/s00170-014-6128-5.

19. A novel prediction model for thin plate deflections considering milling residual stresses / Z. Jiang, Y. Liu, L. Li, W. Shao // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74. – P. 37–45. – doi: 10.1007/s00170-014-5952-y.

20. Energy criteria for machining-induced residual stresses in face milling and their relation with cutting power / Y. Ma, P. Feng, J. Zhang, Z. Wu, D. Yu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81. – P. 1023–1032. – doi: 10.1007/s00170-015-7278-9.

21. Ивлев Д.Д. Механика пластических сред. В 2 т. Т. 2. Общие вопросы. Жесткопластическое и

упругопластическое состояние тел. Упрочнение. Деформационные теории. Сложные среды. – М.: Физматлит, 2002. – 448 с. – ISBN 5-9221-0291-5.

22. *Воронцов А.Л., Стратьев В.К., Ступников В.П.* О пробе Бринелля и внедрении пуансона в тело больших поперечных размеров. Ч. 1 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 12–21.

23. *Воронцов А.Л., Стратьев В.К., Ступников В.П.* Определение напряженного и деформированного состояния и учет упрочнения при внедрении пуансона в тело больших поперечных размеров. Ч. 2 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 47–59.

24. *Смелянский В.М., Шапарин А.А.* Повышение эффективности упрочнения деталей машин методами ППД на основе численного моделирования процесса формирования механических свойств поверхностного слоя // Повышение качества обработки и сборки деталей автомобилей и тракторов. – М.: МАМИ, 1986. – С. 33–45.

25. *Смелянский В.М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с. – ISBN 5-217-03065-8.

26. *Блюментейн В.Ю., Смелянский В.М.* Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с. – ISBN 5-942-75342-9.

27. *Кречетов А.А.* Методика расчета параметров механического состояния поверхностного слоя деталей машин // Вестник КузГТУ. – 2001. – № 5. – С. 27–31.

28. *Овсеенко А.Н., Gajek M., Серебряков В.И.* Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами. – Opole: Politechnika Opolska, 2001. – 228 с. – ISBN 83-88492-06-3.

29. *Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф.* ANSYS для инженеров: справочное пособие. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с. – ISBN 5-94275-048-3.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Surface Plastic Deformation Mechanics. The Hardenable Elastic-Plastic Body Model

Maxim Mahalov<sup>a, \*</sup>, Valeriy Blumenstein<sup>b</sup>

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>, [maxim\\_ste@mail.ru](mailto:maxim_ste@mail.ru), <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0002-3711-1535>, [blumenstein@rambler.ru](mailto:blumenstein@rambler.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 08 August 2018

Revised: 21 August 2018

Accepted: 22 October 2018

Available online: 15 December 2018

#### Keywords:

Residual stresses

Metal mechanical condition

Technological inheritance

Surface layer

Hardening treatment

Surface plastic deformation

#### Acknowledgements

The authors express their gratitude to the master's degree student Khudoynazarov AA (group KTm-161), who participated in the research.

### ABSTRACT

**Introduction.** The metal mechanical state, such as deformation degree and macroscopic residual stresses (MRS) largely determines product operational life, especially in different types of alternating loads. Wide possibilities for creating a favorable mechanical state of the metal have the methods of finishing and hardening treatment by surface plastic deformation (SPD). At the same time, an accurate calculation of the mechanical state of the SPD is not always possible, which preserves the relevance of the study and the creation of model ideas about the formation of the mechanical state and MRS at the stages of mechanical processing in the manufacture of metal products. It is noted that the finite element method (FEM) allows taking into account the change in the mechanical state upon multiple loading of the same metal microvolume and to obtain more accurate analytical solutions. **The research purpose** consists in the development of the SPD mechanics' theoretical positions based on the development of a hardenable elastic-plastic body model. The paper presents a FEM model of the surface layer mechanical state formation during hardening treatment by surface plastic deformation (SPD), taking into account the technological inheritance phenomenon. **Results and discussion.** The simulation is carried out and the distributions of the parameters of stress-strain are obtained; the parameters of the mechanical state of the surface layer and the residual stresses generated in the process of hardening treatment of SPD are calculated. A feature of the proposed model is taking into account the phenomenon of technological inheritance, supplemented by the effect of the hardened body: together with the metal properties evolution, occurred in previous machining operations, the current technological operation changes properties are taken into account. In the proposed model, taking into account the effect of the hardened body is implemented in the form of a scheme of multiple loading and unloading of metal parts as it moves through the space of the deformation zone, which made it possible to accurately describe the phenomenology of the SPD process. The presented results confirm the prospects of spreading the stated model concepts to other mechanical processing methods and various types of operational loading of hardened responsible products.

**For citation:** Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Surface plastic deformation mechanics. The hardenable elastic-plastic body model. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 6–20. doi:10.17212/1994-6309-2018-20.4-6-20. (In Russian).

### References

1. Suslov A.G., Blyumenstein V.Yu., Gurov R.V., Isaev A.N., Odintsov L.G., Pleshakov V.V., Fedorov V.V., Shneider Yu.G. *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem*. V 2 t. T. 1 [Technology and tools of finishing and hardening treatment of parts by surface plastic deformation. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 480 p. ISBN 978-5-94275-710-6.
2. Suslov A.G., Babichev A.P., Kirichek A.V., Ovseenko A.V., Motrenko P.D., Ambrosimov S.K., Afonin A.I., Gurov R.V., Prokof'ev A.N., Solov'ev D.A. *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem*. V 2 t. T. 2. [Technology and tools of finishing and hardening

#### \* Corresponding author

Mahalov Maxim S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev,  
 28 Vesennaya st.,  
 650000, Kemerovo, Russian Federation  
 Tel.: +7-903-907-45-02, e-mail: [maxim\\_ste@mail.ru](mailto:maxim_ste@mail.ru)

treatment of parts by surface plastic deformation. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 444 p. ISBN 978-5-94275-709-0; ISBN 978-5-94275-711-3.

3. Bukatyi S.A., Kondratov A.P., Bukatyi A.S. [Thin-walled disks technological residual deformations prediction after surface plastic deformation hardening method]. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya*. Materialy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Proceedings of the International scientific and technical conference "Problems and prospects of engine building development"]. Samara, 2006, vol. 1, pp. 183–184. (In Russian).

4. Zaides S.A., Emel'yanov V.N., Popov M.E., Kropotkina E.Yu., Bubnov A.S. *Deformiruyushchaya obrabotka valov* [Deforming treatment of shafts]. Irkutsk, ISTU Publ., 2013. 452 p. ISBN 978-508038-0869-5.

5. Sidyakina Yu.I., Trunin A.V., Shevtsov A.N. Sfericheskaya model' issledovaniya kontaktnoi uprugoplasticheskoi deformatsii [Spherical model of the contact elastoplastic strain research]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia Volgograd State Technical University*, 2010, no. 12 (72), pp. 48–52.

6. Kuznetsov V.P., Gorgots V.G. Nonlinear dynamics of the elastic smoothing of surfaces. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, iss. 12, pp. 1201–1206. doi: 10.3103/S1068798X08120113. Translated from *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 12, pp. 61–65.

7. Wang W.W., Jia B.B., Yu J.B. A new flexible sheet metal forming method and its stamping process. *The 14th IFToMMWorld Congress*, Taipei, Taiwan, October 25–30, 2015.

8. Liou J.J., El-Wardany T.I. Finite element analysis of residual stress in Ti-6Al-4V alloy plate induced by deep rolling process under complex roller path. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014, art. 786354. doi: 10.1155/2014/786354.

9. Sayahi M., Sghaier S., Belhadjsalah H. Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 67 (5), pp. 1665–1673. doi: 10.1007/s00170-012-4599-9.

10. Gopinath A., Lim A., Nagarajan B., Wong C.C., Maiti R., Castagne S. Introduction of enhanced compressive residual stress profiles in aerospace components using combined mechanical surface treatments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, iss. 157 (1), p. 012013. doi: 10.1088/1757-899X/157/1/012013.

11. Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process. *Manufacturing Technology*, 2017, vol. 54 (1), pp. 237–240.

12. Sartkulvanich P., Altan T., Jasso F., Rodriguez C. Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, vol. 129. doi: 10.1115/1.2738121.

13. Huang X., Sun J., Li J. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, pp. 1035–1041. doi: 10.1007/s00170-014-6533-9.

14. Ji X., Zhang X., Liang S. Predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 70, pp. 2159–2168. doi: 10.1007/s00170-013-5439-2.

15. Su J.-C., Young K.A., Ma K., Srivatsa S., Morehouse J.B., Liang S.Y. Modeling of residual stresses in milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, pp. 717–733. doi: 10.1007/s00170-012-4211-3.

16. Jiang X., Li B., Yang J., Zuo X.Y., Li K. An approach for analyzing and controlling residual stress generation during high-speed circular milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66, pp. 1439–1448. doi: 10.1007/s00170-012-4421-8.

17. Jiang X., Li B., Yang J., Zuo X.Y. Effects of tool diameters on the residual stress and distortion induced by milling of thin-walled part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 68, pp. 175–186. doi: 10.1007/s00170-012-4717-8.

18. Chen J., Fang Q., Zhang L. Investigate on distribution and scatter of surface residual stress in ultra-high speed grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 615–627. doi: 10.1007/s00170-014-6128-5.

19. Jiang Z., Liu Y., Li L., Shao W. A novel prediction model for thin plate deflections considering milling residual stresses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, pp. 37–45. doi: 10.1007/s00170-014-5952-y.

20. Ma Y., Feng P., Zhang J., Wu Z., Yu D. Energy criteria for machining-induced residual stresses in face milling and their relation with cutting power. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 81, pp. 1023–1032. doi: 10.1007/s00170-015-7278-9.

21. Ivlev D. D. *Mekhanika plasticheskikh sred. V 2 t. T. 2. Obshchie voprosy. Zhestkoplasticheskoe i uprugoplasticheskoe sostoyanie tel. Uprochnenie. Deformatsionnye teorii. Slozhnye sredy* [Plastic substance mechanics. In 2 vol. Vol. 2. General issue. Rigid-plastic and elastic-plastic bodies condition. Hardening. Deformation theories. Complex substances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 448 p. ISBN 5-9221-0291-5.

22. Vorontsov A.L., Strat'ev V.K., Stupnikov V.P. O probe Brinellya i vnedrenii puansona v telo bol'shikh poperechnykh razmerov. Ch. 1 [On Brinell test and the punch indentation into a body with large cross section. Pt. 1]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2012, no. 2, pp. 12–21.

23. Vorontsov A.L., Strat'ev V.K., Stupnikov V.P. Opredelenie napryazhennogo i defor-mirovannogo sostoyanii i uchet uprochneniya pri vnedrenii puansona v telo bol'shikh pope-rechnykh razmerov. Ch. 2 [Determination of stress and strain states and consideration for reinforcement during the punch indentation into a body with large cross section. Pt. 2]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 47–59.

24. Smelyanskii V.M., Shaparin A.A. Povyshenie effektivnosti uprochneniya detalei mashin metodami PPD na osnove chislenogo modelirovaniya protsessa formirovaniya mekhanicheskikh svoystv poverkhnostnogo sloya [SPD methods machine parts hardening efficiency Improving based on the surface layer mechanical properties formation numerical simulation]. *Povyshenie kachestva obrabotki i sborki detalei avtomobilei i traktorov* [Improving the quality of processing and assembly of parts of cars and tractors]. Moscow, MAMI Publ., 1986, pp. 33–45.

25. Smelyanskii V.M. *Mekhanika uprochneniya detalei poverkhnostnym plasticheskim de-formirovaniem* [Surface plastic deformation parts hardening mechanics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. ISBN 5-217-03065-8.

26. Blyumenstein V.Yu., Smelyanskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Technological inheritance mechanics at the machine parts processing and operation stages]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 400 p. ISBN 5-942-75342-9.

27. Krechetov A.A. Metodika rascheta parametrov mekhanicheskogo sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detalei mashin [Machine parts surface layer mechanical condition parameters calculation method]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2001, no. 5, pp. 27–31.

28. Ovseenko A.N., Gajek M., Serebryakov V.I. *Formirovanie sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detalei mashin tekhnologicheskimi metodami* [Machine parts surface layer condition formation by technological methods]. Opole, Politechnika Opolska Publ., 2001. 228 p. ISBN 83-88492-06-3.

29. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. *ANSYS dlya inzhenerov* [ANSYS for engineers]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004. 512 p. ISBN 5-94275-048-3.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).