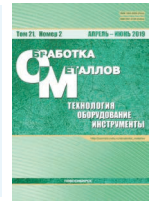




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Механика процесса ППД

Остаточные напряжения в упрочняемом упругопластическом теле

Максим Махалов ^{a, *}, Валерий Блюменштейн ^b

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>, maxim_ste@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-3711-1535>, blumenstein@rambler.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787.4

История статьи:

Поступила: 26 ноября 2018
 Рецензирование: 27 марта 2019
 Принята к печати: 11 апреля 2019
 Доступно онлайн: 15 июня 2019

Ключевые слова:

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

Благодарности:

Авторы выражают признательность А.А. Худойназарову, принявшему участие в проведении исследований.

АННОТАЦИЯ

Введение. Остаточные напряжения (ОН) первого рода являются одним из ключевых параметров механического состояния металла, который в значительной степени определяет эксплуатационную долговечность изделий и конструкций. Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) создает в поверхностном слое (ПС) благоприятные сжимающие ОН и существенно повышает усталостную долговечность как до, так и после появления усталостной трещины. В этой области знаний остается актуальной проблема высокой сложности и трудоемкости экспериментального определения ОН, а также проблема расчета остаточных напряжений при сложных немонокотонных видах нагружения, к которым относится большинство способов механической обработки. **Цель работы:** развитие теории формирования и повышение достоверности расчетов остаточных напряжений при обработке ППД на основе модели упрочняемого упругопластического тела. **Результаты и обсуждение.** В работе представлены результаты моделирования и выполнены расчеты компонентов тензора ОН в процессе ППД. Модель выполнена с помощью метода конечных элементов на основе концептуального аппарата механики технологического наследования (ТН) с учетом эффекта упрочняемого тела. Установлено, что наибольшие значения сжимающих остаточных напряжений характерны для осевого компонента, при этом экстремум может располагаться как на поверхности детали, так и на некотором удалении от нее. Глубина распространения сжимающих остаточных напряжений составляет примерно 3 мм при глубине распространения существенных по величине напряжений около 7 мм. Выявлено влияние упрочнения металла на распределение остаточных напряжений. На примере осевого (наибольшего по величине) компонента показано, что разница максимальных значений составляет почти 30%. Полученный результат соответствует представлениям о том, что упрочненный металл, имеющий повышенный предел текучести, допускает присутствие больших по величине ОН. Выявлены тенденции изменения распределения компонентов тензора ОН по глубине ПС в зависимости от основных параметров режима обработки ППД: натяга и профильного радиуса ролика.

Для цитирования: Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса ППД. Остаточные напряжения в упрочняемом упругопластическом теле // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 110–123. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123.

Введение

Величина и характер распределения остаточных напряжений (ОН) первого рода по сечению деталей – один из ключевых параметров механического состояния металла, в значительной степени определяющих эксплуатационную

долговечность изделий [1–2]. По мнению ряда исследователей, при появлении на поверхности детали начальной трещины или иного концентратора напряжений роль сжимающих ОН поверхностного слоя (ПС) в усталостной долговечности детали напряжений становится определяющей и может дать увеличение долговечности в несколько раз.

Основной причиной возникновения ОН первого рода является неравномерная по сечению детали пластическая деформация тепловой или механической природы.

*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

Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) существенно повышает сопротивление усталости, содействует большей долговечности до и после появления усталостной трещины. Известно, что для сталей с низким содержанием углерода повышение сопротивления усталости обусловлено в большей степени повышением поверхностной твердости (упрочнением), в то время как для твердых сталей – в большей степени появлением сжимающих остаточных напряжений, сдерживающих появление и развитие мелких трещин.

Обработка ППД применяется во многих областях техники как для повышения качества поверхности, так и для повышения прочности металла деталей машин в условиях усталости, фреттинг-нагрузках и др. [3]. К ним относят: оси и валы автомобилей, валы редукторов сельскохозяйственных, дорожных и горных машин, колесные диски самолетов, высоконагруженные крепежные изделия, а также диски и лопатки турбин, лопасти вентилятора компрессора и др.

Эффекты упрочнения и сжимающих ОН исследованы для различных деталей из разных материалов [4–8]. Так, например, в исследовании W.J. Qin, C. Dong and X. Li проведена оценка и показан эффект повышения усталостной прочности коленчатого вала с учетом ОН [8]. Авторами работ [9–10] экспериментально исследованы ОН поверхностного слоя после упрочняющей обработки различными способами поверхностного пластического деформирования (ППД). В работе [11] предложена модель релаксации ОН на стадии эксплуатационного усталостного нагружения.

Большинство исследователей отмечают необходимость измерений, оценки, прогнозирования и управления величиной и распределением ОН. Остаточные напряжения измеряют методами тензометрии [3], оценки деформаций при релаксации остаточных напряжений [12], путем послойного химического удаления слоев материала с оценкой возникающей деформации [12], методами дифракции рентгеновских лучей [13], микроиндентирования [14] и др.

В работе [15] показано, что поле остаточных напряжений – это поле энергии деформации. Распределение остаточных напряжений, включающее численное значение и существующий диапазон, коррелирует с количеством энергии. На этой основе авторами предложен интеграл

плотности энергии деформации, при этом установлено, что силы трения и тепловые эффекты имеют основное значение в определении окончательного распределения ОН.

Наиболее адаптированным для решения задач по оценке остаточных напряжений после упрочнения в процессах механической обработки и их влияния на усталостную прочность является метод конечных элементов (МКЭ). Уже в упомянутой статье [8] МКЭ использован для моделирования поведения коленчатого вала при усталостном нагружении с учетом остаточных напряжений. Xiaoming Huang, Jie Sun and Jianfeng Li выполнили МКЭ-моделирование и экспериментальное исследование остаточных напряжений, результаты которых показали высокую сходимость [16]. В работах [17–20] представлены результаты численного моделирования остаточных напряжений в процессах резания с учетом трения, температур, смазывающих средств при обработке различных материалов разными инструментами.

В работе [21] автором проведены исследования механики процесса ППД и созданы 2D- и 3D МКЭ-модели обкатывания роликом. Результаты моделирования, включающие в себя поверхностные деформации и остаточные напряжения, показали высокую сходимость с экспериментальными данными, полученными из литературных источников.

Авторы настоящей работы отмечают, что в рассматриваемой области знаний остаются актуальными две важные проблемы.

1. Сложность и высокая трудоемкость измерения ОН, поскольку большая часть методик основана на разрушении детали либо послойном удалении металла ПС и измерении остаточных деформаций детали с последующим расчетом величины ОН. При этом рентгеновские способы позволяют выявлять ОН второго рода и преимущественно в тонких поверхностных слоях, исчисляемых десятками микрометров, не позволяющими определять распределение ОН по глубине упрочненного ПС, исчисляемого миллиметрами.

Для этого направления актуальной и перспективной является разработка и развитие экспериментальных экспресс-методик, основанных на физических методах неразрушающего контроля (НК): акустических, магнитных шумов, коэрцитивной силы и др.

2. Известные в настоящее время аналитические модели зачастую охватывают только простые (одно-, двухосные) виды нагружения и не позволяют с удовлетворительной точностью рассчитывать остаточные напряжения при сложных немонотонных видах нагружения, к которым относится большинство способов механической обработки.

Цель работы: развитие теории формирования и повышение достоверности расчетов остаточных напряжений при обработке ППД на основе модели упрочняемого упругопластического тела.

Задачи исследований: моделирование и аналитическое определение ОН в процессе ППД на основе аппарата механики ТН с учетом эффекта упрочняемого тела; выявление взаимосвязей компонентов тензора ОН с основными параметрами режима обработки ППД.

Теория

Для решения этих задач, в работе [22] авторами предложена и реализована для способа ППД модель упрочняемого упругопластического тела.

Модель разработана с использованием МКЭ на основе аппарата механики технологического наследования (ТН), в рамках которого [10–11]:

- изменение состояния металла ПС на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного нагружения рассматривается как единый непрерывный процесс накопления деформации, исчерпания запаса пластичности и трансформации остаточных напряжений. Наряду с традиционными параметрами качества этот процесс описывается соответственно: накопленной степенью деформации сдвига (СДС) Λ , степенью исчерпания запаса пластичности (СИЗП) Ψ и компонентами тензора ОН $[T_{\text{ост}}]$;

- изменение состояния ПС на стадиях механической обработки происходит в очаге пластической деформации (ОД), возникающем в зоне контакта инструмента с ПС обрабатываемой детали;

- на каждой стадии механической обработки или эксплуатации формирование нового тензора ОН первого рода происходит под влиянием:

- пластической деформации, накопленной металлом к текущему моменту времени, и ОН, унаследованных от предыдущих стадий (история нагружения);

- напряжений, возникающих при приложении нагрузки и упругом разгрузении на рассматриваемой стадии;

- напряжений, дополнительно возникающих при раскреплении детали.

Теоретические исследования выполнялись в плоскодеформированной постановке, описанной в работах [22–23].

Согласно известной теореме о разгрузке тензор остаточных напряжений представляет собой разность напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложении нагрузки $[T_{\sigma \text{деф}}]$, и напряжений, которые возникли бы в идеально упругом теле при идентичном нагружении $[T_{\sigma \text{раз}}]$, суммированную с напряжениями упругой разгрузки при раскреплении детали $[T_{\sigma \text{раскр.дет}}]$ и упругими тепловыми напряжениями разгрузки $[T_{\sigma t^0}]$:

$$[T_{\sigma \text{ост}}] = [T_{\sigma \text{деф}}] - [T_{\sigma \text{раз}}] + [T_{\sigma \text{раскр.дет}}] + [T_{\sigma t^0}]. \quad (1)$$

Моделируемый материал (сталь 45) принимался изотропным упрочняющимся упругопластическим. С учетом этих и других (малый нагрев при рассматриваемом нагружении) принятых при создании модели начальных/граничных условий и допущений возникающие деформации имели только механическую природу. Тензор остаточных напряжений в системе координат детали представлялся в виде

$$[T_{\sigma \text{ост}}]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{\text{деф}} - \sigma_x^{\text{раз}} & \sigma_{xy}^{\text{деф}} - \sigma_{xy}^{\text{раз}} & 0 \\ \sigma_{xy}^{\text{деф}} - \sigma_{xy}^{\text{раз}} & \sigma_y^{\text{деф}} - \sigma_y^{\text{раз}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\sigma_x^{\text{деф}} + \sigma_y^{\text{деф}}) - (\sigma_x^{\text{раз}} + \sigma_y^{\text{раз}})}{2} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\sigma_x^{\text{деф}}$, $\sigma_y^{\text{деф}}$, $\sigma_{xy}^{\text{деф}}$ – компоненты тензора реальных упругопластических напряжений при приложении нагрузки; $\sigma_x^{\text{раз}}$, $\sigma_y^{\text{раз}}$, $\sigma_{xy}^{\text{раз}}$ – компоненты тензора идеальноупругих напряжений, возникающих в изделии при идентичном нагружении.

Ключевой особенностью предложенной модели является учет эффекта упрочняемого тела, заключающийся в изменении механического

состояния частиц металла в процессе их перемещения через пространство очага деформации [22].

Таблица 1

Table 1

Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты расчетов компонентов остаточных напряжений для модели обкатывания роликом № 5 (табл. 1) со следующими параметрами режима: профильный радиус $R_{пр} = 5$ мм, заданный натяг $h_3 = 0,05$ мм, подача $S = 0,1$ мм/об. Материал детали: сталь 45 ГОСТ 1050–88, 160...180 HV.

Наибольшие значения сжимающих остаточных напряжений, достигающие -600 МПа, характерны для осевого компонента σ_x , при этом для рассматриваемого режима обработки экстремум располагается на поверхности детали. Глубина распространения сжимающих ОН составляет примерно 3 мм при глубине распространения существенных по величине напряжений около 7 мм (рис. 1).

Тангенциальный (окружной) компонент σ_z в выбранной плоскодеформированной постановке моделирования имеет сопоставимые с осевым компонентом значения сжимающих напряжений

Режимы обработки ППД
SPD process conditions

Номер модели	$R_{пр}$, мм	h_3 , мм
1	2	0,03
2	5	
3	10	
4	2	0,05
5	5	
6	10	
7	2	0,07
8	5	
9	10	

(до -520 МПа). Максимальные значения также имеют место на поверхности детали.

Радиальному компоненту σ_y свойственны значительно меньшие значениями и соответственно перепады как в область растягивающих, так и в область сжимающих значений при тех же глубинах распространения. На поверхности и в близлежащем слое радиальный компонент преимущественно отрицательный (до -50 МПа).

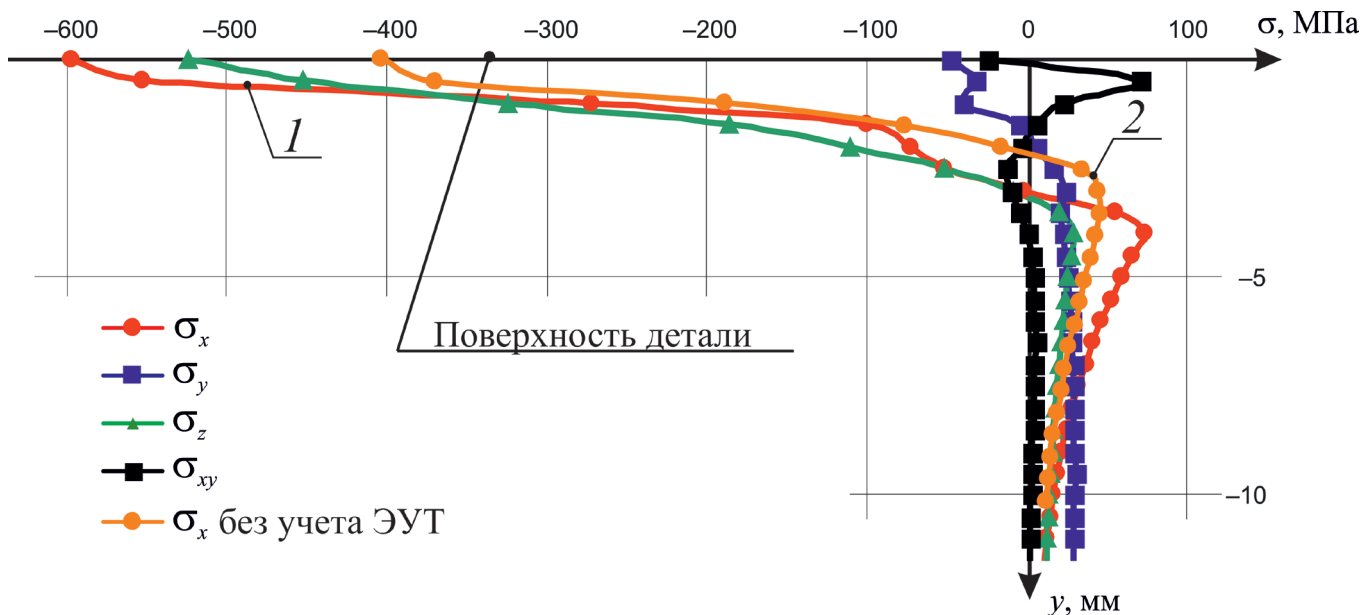


Рис. 1. Распределение компонентов тензора остаточных напряжений (после 300-го шага моделирования) по глубине поверхностного слоя. Осевые остаточные напряжения σ_x с учетом (1) и без учета (2) эффекта упрочняемого тела

Fig. 1. The distribution of the components of the residual stress tensor (after the 300th simulation step) over the depth of the surface layer. Axial residual stresses σ_x , taking into account (1) and without (2) the effect of the hardened body

Особенностью данного решения является определение касательного компонента σ_{xy} , распределение которого имеет сложный характер при сравнительно небольшой величине напряжений на поверхности и на некоторой глубине поверхностного слоя.

Качественная картина распределения по глубине и численные значения соответствуют результатам многих отечественных и зарубежных исследователей. Так, по результатам исследований В.М. Смелянского и его учеников, для моделируемой в данной работе стали 45 величина осевых ОН при ППД достигает -800 МПа, а окружных – до -400 МПа [9]. Автор работы [24] отмечает возможность расположения экстремума напряжений как на поверхности детали, так и на некотором удалении от нее.

По данным [9], радиальные ОН после ППД близки к нулю, что, по мнению автора работы, не является существенным недостатком в силу незначительного влияния этого компонента на циклическую долговечность детали.

Для выявления взаимосвязей остаточных напряжений с режимами обработки ППД была построена и решена серия КЭ-моделей в соответствии с планом, приведенным в табл. 1. При этом варьировались ключевые параметры режима, в наибольшей степени влияющие на протекание процессов пластической деформации в поверхностном слое. Значения остальных параметров режима обработки при моделировании составили:

- частота вращения детали $n = 300$ об/мин (время одного оборота детали $0,2$ с);
- подача $S = 0,1$ мм/об;
- угол деформации в окружном направлении 10° (принят по данным работы [10]);
- с учетом времени одного оборота детали и принятого угла деформации время одного цикла нагрузки-разгрузки поверхностного слоя составило $\frac{0,2c \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 0,0055$ с.

Для того чтобы показать влияние упрочнения металла на формирование ОН, для модели № 5 также выполнялось моделирование процесса без учета эффекта упрочнения тела (ЭУТ).

В представленной постановке моделирования учет ЭУТ реализован как за счет схемы

многократного взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью, так и посредством использования аппроксимирующей функции кривой течения, учитывающей упрочнение через величину тангенциального модуля. Для этого значение последнего ($T_{\text{мод}} = 2,596 \cdot 10^9$ Па) выбиралось с целью максимального приближения аппроксимирующей функции к форме реальной кривой течения стали 45.

Теоретически для исключения ЭУТ необходимо принять $T_{\text{мод}} = 0$ Па, однако для сохранения взаимосвязи напряжений и деформаций на участке пластического течения, значение данного параметра было уменьшено на три порядка ($T_{\text{мод}} = 2,596 \cdot 10^6$ Па), что снижает реальный эффект упрочнения при моделировании в 1000 раз.

Рассмотрим распределение ОН по глубине упрочненного ПС, полученные как с учетом, так и без учета эффекта упрочняемого тела (табл. 2). На рис. 1 представлены распределения осевого компонента.

Модель с учетом ЭУТ обнаруживает большие по величине сжимающие напряжения. Разница максимальных значений сжимающих ОН в модели без учета упрочнения относительно модели с учетом ЭУТ составляет почти 30 %. Полученный результат соответствует представлениям о том, что упрочненный металл, имеющий повышенный предел текучести, допускает присутствие больших по величине остаточных напряжений.

Радиальный компонент ОН в модели, учитывающей ЭУТ, также характеризуется большими в два раза значениями как сжимающих, так и растягивающих напряжений.

Окружной (тангенциальный) компонент в обеих моделях имеет преимущественно сжимающие значения, экстремум лежит на поверхности детали. Как и для радиального компонента, модель с учетом упрочнения имеет в два раза большие значения напряжений обоих знаков.

Касательный в плоскости подачи компонент для обоих рассматриваемых случаев имеет схожий характер распределения, однако модель, учитывающая ЭУТ, имеет несколько больший итоговый размах значений.

Значения компонентов тензора остаточных напряжений
The values of the residual stress tensor components

Компонент		С учетом ЭУТ		Без учета ЭУТ		Размах значений	
		min	max	min	max	с ЭУТ	без ЭУТ
Осевой	σ_x , МПа	-600	74	-400	43	674	443
Радиальный	σ_y , МПа	-50	30	-22	17	80	39
Окружной	σ_z , МПа	-523	29	-248	13	552	261
Касательный	σ_{xy} , МПа	-24	70	-41	40	94	81

Для выявления взаимосвязей полученного тензора ОН с технологическими режимами было использовано описание каждого из полученных компонентов тензора в категориях координат характерных точек (на примере σ_x) [25, стр. 54, рис. 4]:

- 1) напряжения на поверхности детали (точка A) – σ_{xA} ;
- 2) напряжения в первом экстремуме (точка B) – σ_{xB} ;
- 3) глубина расположения первого экстремума (точка B) – $h\sigma_{xB}$;
- 4) глубина распространения сжимающих напряжений (точка C) – $h\sigma_{xC}$;
- 5) напряжения во втором экстремуме (точка D) – σ_{xD} ;
- 6) глубина расположения второго экстремума (точка D) – $h\sigma_{xD}$;
- 7) глубина распространения ОН (точка E) – $h\sigma_{xE}$.

По данным работы [10], основное влияние на величину и глубину распространения остаточных напряжений оказывают натяг h_3 , профильный радиус $R_{пр}$ ролика.

В результате решения моделей с различными значениями этих факторов наряду с другими компонентами выявлена тенденция изменения осевого компонента тензора ОН (рис. 2–5).

Модели с натягом $h_3 = 0,03$ мм имеют максимальные осевые сжимающие напряжения на поверхности детали ($y = 0$ мм).

При увеличении h_3 существует тенденция к увеличению максимальных значений сжимающих напряжений, однако этот экстремум смеща-

ется от поверхности в глубину до 0,5 мм и приводит к формированию в тонком приповерхностном слое растягивающих ОН небольшой величины.

Изменение эпюры осевых ОН при изменении профильного радиуса ролика позволяет сделать вывод о том, что для достижения наилучшего распределения по глубине каждому значению натяга должно соответствовать некоторое оптимальное значение профильного радиуса ролика: соотношение указанных величин лежит в диапазоне: $0,007 < \frac{h_3}{R_{пр}} < 0,015$.

Полученные результаты согласуются с результатами работ [9, 10, 24, 26–28], где показано, что увеличение усилия обкатывания по упругой схеме (либо натяга ролика по жесткой схеме) при ППД увеличивает ОН сжатия на поверхности и в первом экстремуме, а также глубину его расположения.

Увеличение профильного радиуса ролика снижает максимальные сжимающие напряжения, что в целом соответствует результатам работы [10]. Однако результаты исследований ОН при ППД, представленные, например, в работах [27, 28], показывают, что при увеличении $R_{пр}$, несмотря на снижение сжимающих ОН на поверхности, происходит увеличение осевых и окружных ОН в первом подповерхностном экстремуме.

Глубина распространения сжимающих ОН ($h\sigma_{xC}$) и расположения второго (положительного) экстремума ($h\sigma_{xD}$) увеличиваются с увеличением обоих варьируемых параметров (рис. 5). С ростом h_3 от 0,05 до 0,07 мм увеличение этих глубин несколько интенсивнее.

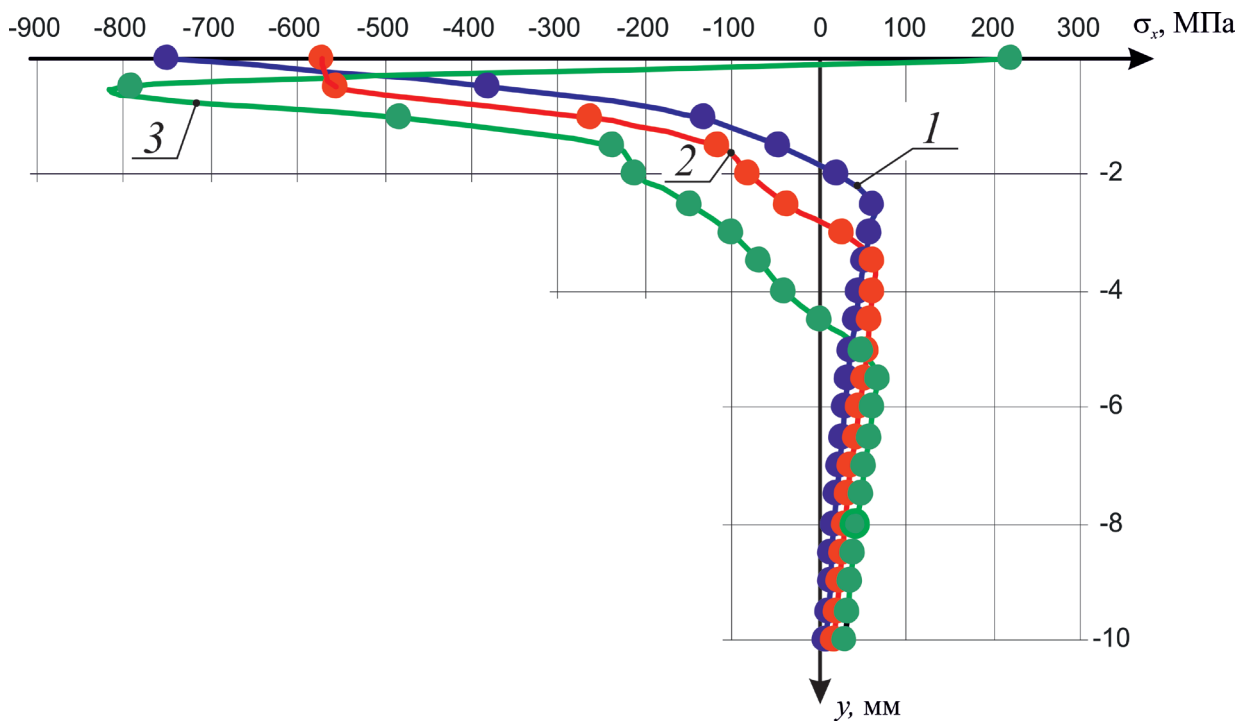


Рис. 2. Распределение осевых остаточных напряжений σ_x в моделях №1 (1), № 4 (2) и № 7 (3) ($R_{pr} = 2$ мм)

Fig. 2. The distribution of axial residual stresses σ_x in models No.1 (1), No.4 (2) and No. 7 (3) ($R_{pr} = 2$ mm)

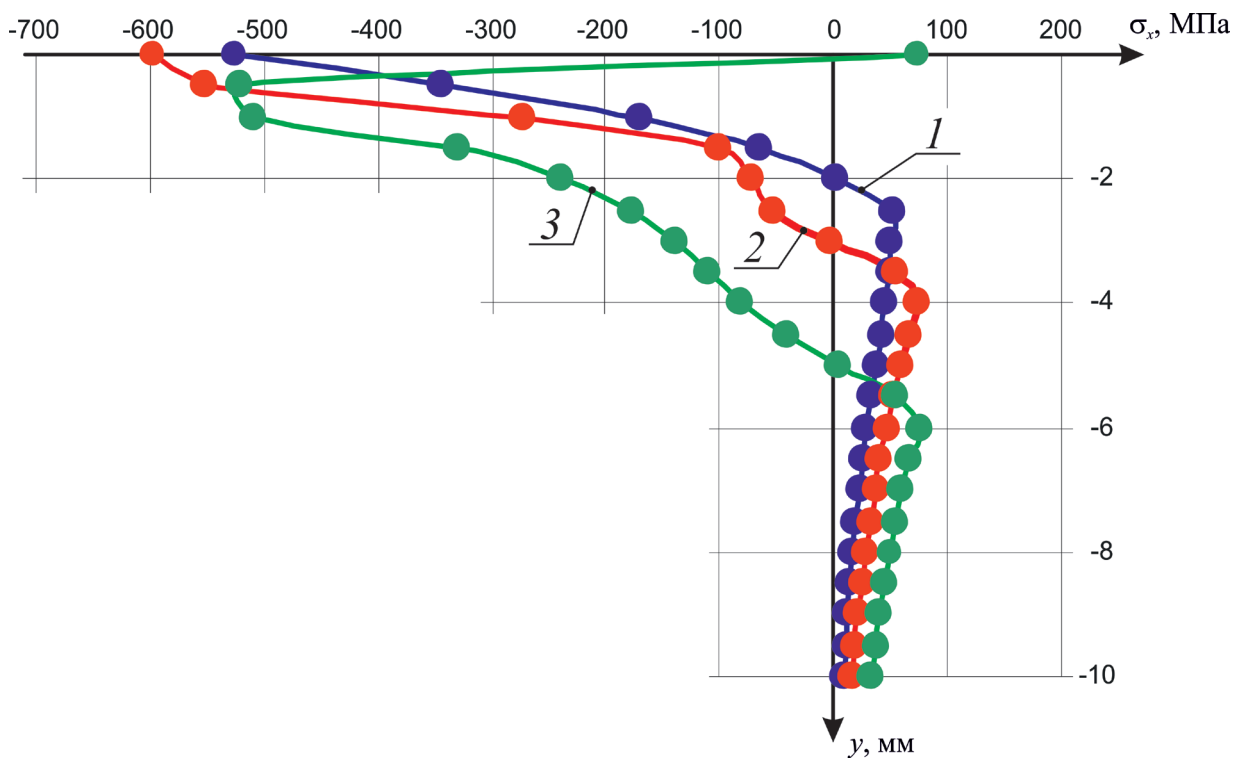


Рис. 3. Распределение осевых остаточных напряжений σ_x в моделях № 2 (1), № 5 (2) и № 8 (3) ($R_{pr} = 5$ мм)

Fig. 3. The distribution of axial residual stresses σ_x in models No. 2 (1), No. 5 (2) and No. 8 (3) ($R_{pr} = 5$ mm)

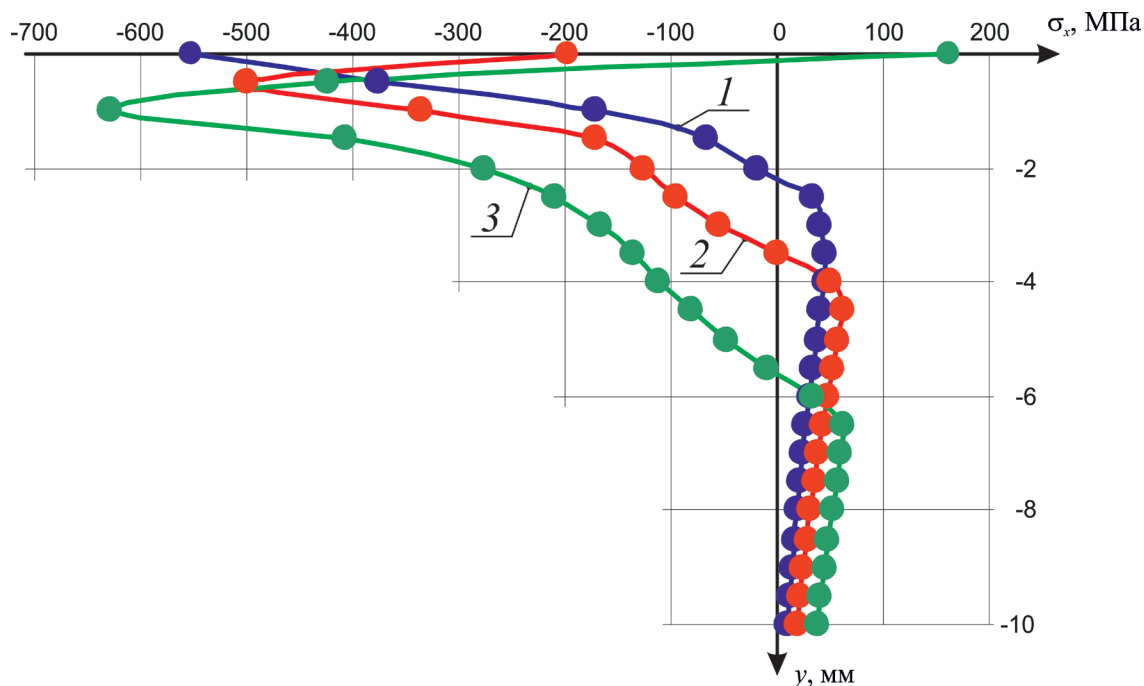


Рис. 4. Распределение осевых остаточных напряжений σ_x в моделях № 3 (1), № 6 (2) и № 9 (3) ($R_{пр} = 10$ мм)

Fig. 4. The distribution of axial residual stresses σ_x in models No. 3 (1), No. 6 (2) and No. 9 (3) ($R_{pr} = 10$ mm)

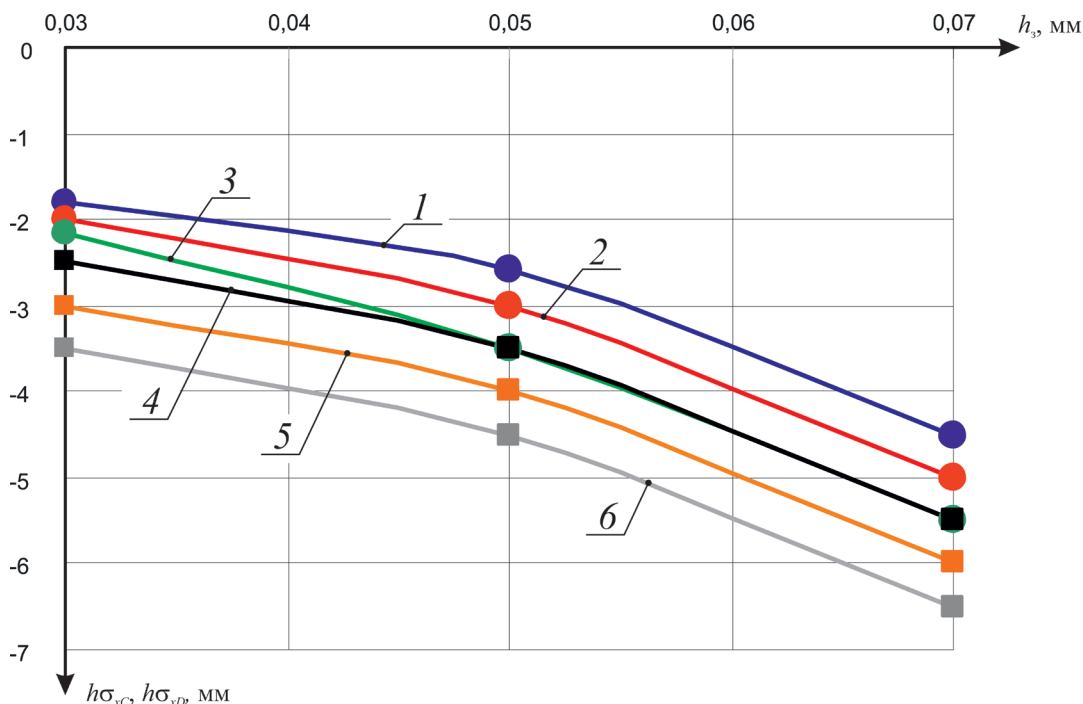


Рис. 5. Взаимосвязи глубины распространения осевых сжимающих ОН $h\sigma_{xC}$ и глубины расположения второго (положительного) экстремума $h\sigma_{xD}$ от h_z : $h\sigma_{xC}$ при $R_{пр} = 2$ мм (1); $R_{пр} = 5$ мм (2); $R_{пр} = 10$ мм (3); $h\sigma_{xD}$ при $R_{пр} = 2$ мм (4); $R_{пр} = 5$ мм (5); $R_{пр} = 10$ мм (6)

Fig. 5. Interrelations of the depth of propagation of axial compressive RS $h\sigma_{xC}$ and the depth of the second (positive) extremum $h\sigma_{xD}$ from h_z : $h\sigma_{xC}$ with $R_{pr} = 2$ mm (1); $R_{pr} = 5$ mm (2); $R_{pr} = 10$ mm (3); $h\sigma_{xD}$ with $R_{pr} = 2$ mm (4); $R_{pr} = 5$ mm (5); $R_{pr} = 10$ mm (6)

При увеличении натяга радиальный компонент имеет тенденцию к увеличению размаха максимальных сжимающих и растягивающих напряжений, которые располагаются непосредственно вблизи поверхности детали. С увеличением профильного радиуса ролика размах напряжений, наоборот, уменьшается. Глубина распространения существенных по величине значений при изменении натяга и профильного радиуса ролика значительно не меняется.

Максимальные сжимающие окружные напряжения и глубина их распространения также увеличиваются с увеличением натяга. Экстремум в большинстве случаев располагается на поверхности либо на глубине 0,5...1 мм. Изменение профильного радиуса ролика не оказывает на этот компонент существенного влияния. По данным работы [26], окружной компонент имеет распределение, аналогичное осевому, но характеризуется меньшими напряжениями на поверхности и в первом экстремуме.

Изменение обоих параметров существенно не изменяет распределение касательного компонента по глубине ПС, однако несколько влияет на его значения непосредственно на поверхности. Так, при малых значениях профильного радиуса максимальные касательные напряжения дают большие значения натяга, в то время как при больших значениях $R_{пр}$ – меньшие значения h_3 .

Выводы

1. На основе разработанной для процесса ППД модели упрочняемого упругопластического тела выполнены расчеты компонентов тензора остаточных напряжений с различными режимами обработки. Установлено, что наибольшие остаточные сжимающие напряжения характерны для осевого компонента, при этом экстремум может располагаться как на поверхности детали, так и на некотором удалении от нее. Глубина распространения сжимающих ОН составляет примерно 3 мм при глубине распространения существенных по величине напряжений около 7 мм.

2. Выявлено влияние упрочнения металла на распределение остаточных напряжений. На при-

мере осевого (наибольшего по величине) компонента показано, что разница максимальных значений составляет почти 30 %. Полученный результат соответствует представлениям о том, что упрочненный металл, имеющий повышенный предел текучести, допускает наличие больших по величине остаточных напряжений.

3. Установлены взаимосвязи компонентов тензора остаточных напряжений с основными параметрами режима обработки: натягом и профильным радиусом ролика. Так, для осевого компонента ОН:

– при увеличении натяга имеется тенденция к увеличению максимальных значений сжимающих напряжений, однако этот экстремум смещается от поверхности в глубину до 0,5 мм, что приводит к формированию в тонком приповерхностном слое растягивающих ОН небольшой величины;

– изменение профильного радиуса ролика позволяет сделать вывод о том, что для получения наилучшего распределения осевых ОН по глубине каждому значению натяга соответствует некоторое оптимальное значение профильного радиуса ролика;

– глубина распространения сжимающих ОН, как и глубина расположения второго (положительного) экстремума, увеличивается с увеличением h_d и $R_{пр}$. В диапазоне h_d от 0,05 мм до 0,07 мм такой рост происходит более интенсивно.

Для радиального компонента при увеличении натяга увеличивается, а при увеличении $R_{пр}$, наоборот, уменьшается размах напряжений на поверхности детали.

Максимальные сжимающие окружные напряжения и глубина их распространения увеличиваются с увеличением натяга. Изменение $R_{пр}$ при этом не оказывает существенного влияния.

Для касательного компонента изменение основных параметров режима оказывает лишь некоторое влияние на значения на поверхности.

Список литературы

1. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. В 2 т. Т. 2. / А.Г. Сулов, А.П. Бабичев, А.В. Киричек, А.В. Овсеенко, П.Д. Мотренко, С.К. Амбросимов, А.И. Афонин,

Р.В. Гуров, А.Н. Прокофьев, Д.А. Соловьев; под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2014. – 444 с. – ISBN 978-5-94275-711-3.

2. *Иванов С.И., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25–27.

3. 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. – Vol. 157 (1). – DOI: 10.1088/1757-899X/157/1/012013.

4. *Овсеенко А.Н., Гажек М., Серебряков В.И.* Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами. – Ополе: Politechnika Opolska, 2001. – 228 с. – ISBN 83-88492-06-3.

5. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

6. *Кудрявцев И.В.* Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. – М.: Машгиз, 1951. – 280 с.

7. Технологические остаточные напряжения / под ред. А.В. Подзая. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

8. *Qin W.J., Dong C., Li X.* Assessment of bending fatigue strength of crankshaft sections with consideration of quenching residual stress // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25, iss. 3. – P. 938–947. – DOI: 10.1007/s11665-016-1890-1.

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

10. *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.

11. *Блюментейн В.Ю., Махалов М.С.* Расчетно-аналитическая модель механического состояния поверхностного слоя упрочненной детали на стадии циклического нагружения после обработки размерным совмещенным обкатыванием // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 3. – С. 33–39.

12. *Sadasivam B., Hizal A., Arola D.* Abrasive waterjet peening with elastic prestress: subsurface residual stress distribution // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2007 Conference Paper. – Seattle, WA, 2007. – Vol. 3. – DOI: 10.1115/IMECE2007-43473.

13. *Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S.* Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65, iss. 5–8. – P. 667–678. – DOI: 10.1007/s00170-012-4206-0.

14. A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test / A. Yonezu, R. Kusano, T. Hiyoshi, Xi Chen // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – Vol. 24, iss. 1. – P. 362–372. – DOI: 10.1007/s11665-014-1280-5.

15. 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.

16. *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.

17. 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.

18. *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.

19. *Martell J., Liu C., Shi J.* Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74, iss. 9–12. – P. 1381–1392. – DOI: 10.1007/s00170-014-6089-8.

20. *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.

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

22. *Махалов М.С., Блюментейн 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.

23. *Blumenstein V.Yu., Mahalov M.S., Ostanin O.A.* Simulation and calculation of residual stresses in mining machines components // E3S Web Conferences, 3rd International Innovative Mining Symposium. – 2018. – Vol. 41. – Art. 03012. – DOI: 10.1051/e3s-conf/20184103012.

24. *Паншев Д.Д.* Упрочнение деталей обкаткой шариками. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.

25. *Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С.* Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя при размерном совмещенном обкатывании // Вестник КузГТУ. – 2008. – № 5. – С. 50–58.

26. *Sayahi M., Sghaier S., Belhadjsalah H.* Finite element analysis of ball burnishing process: compari-

sons 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.

27. *Смелянский В.М., Чоудхури Н.А.* К вопросу прогнозирования остаточных напряжений, возникающих в поверхностных слоях деталей при обработке ППД // Совершенствование процессов обработки и сборки деталей автомобиля в условиях применения гибких автоматизированных комплексов: межвузовский сборник. – М.: МАМИ, 1987. – С. 3–16.

28. *Смелянский В.М., Шапарин А.А., Чоудхури Н.А.* Численная модель формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей при обкатывании // Остаточные напряжения – резерв прочности в машиностроении: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – Ростов н/Д., 1991. – С. 7–9.

Конфликт интересов

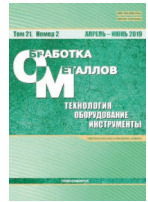
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 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



Surface Plastic Deformation Mechanics The Residual Stresses in the Hardened Elastic-Plastic Body

Maxim Mahalov ^{a,*}, Valeriy Blumenstein ^b

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>,  maxim_ste@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-3711-1535>,  blumenstein@rambler.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 November 2018

Revised: 27 March 2019

Accepted: 11 April 2019

Available online: 15 June 2019

Keywords:

Residual stresses

Metal mechanical condition

Technological inheritance

Surface layer

Hardening treatment

Surface plastic deformation

Metal stress-strain condition

Acknowledgements

The authors are grateful to A. Khudoyazarov who took part in the research.

ABSTRACT

Introduction. Macroscopic residual stresses (RS) are one of the key metal mechanical state parameters, which largely determines products and structures operational life. Surface plastic deformation (SPD) hardening treatment creates in the surface layer (SL) favorable compressive RS and significantly increases the fatigue life both before and after the fatigue cracks appearance. In this area of knowledge, the problem of high complexity and laboriousness of the experimental determination of RS, as well as the problem of calculating residual stresses under complex non-monotonic types of loading, which include most of the methods of mechanical processing, remains relevant. **The research purpose** is to develop the theory of formation and increase the reliability of calculations of residual stresses in the processing of SPD based on the model of a strengthened elastic-plastic body. **Results and discussion.** The paper presents the SPD process simulation results and RS tensor components calculations. The model is made using the finite element method based on the conceptual framework of the mechanics of technological inheritance (TI), taking into account the effect of the strengthened body. It is established that the highest compressive residual stresses values are typical for the axial component, and the extremum can be located both on the workpiece surface and at some distance from it. The depth of compressive residual stresses distribution is about 3 mm with a depth of distribution of significant in magnitude stresses of about 7 mm. The hardened body influence on the residual stresses distribution is performed. The obtained result corresponds to the idea that the hardened metal, which have an increased yield stress limit, allows the larger RS values presence. The tendencies of changes in the distribution of the components of the RS tensor over the depth of the SL, depending on the main parameters of the SPD processing mode: tension and profile radius of the roller, are revealed.

For citation: Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Surface plastic deformation mechanics. The residual stresses in the hardened elastic-plastic body. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 110–123. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123. (In Russian).

References

1. 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 treatment of parts by surface plastic deformation. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 444 p. ISBN 978-5-94275-711-3.
2. Ivanov S.I., Pavlov V.F. Vliyanie ostatochnykh napryazhenii i naklepa na ustalostnuyu prochnost' [The effect of residual stresses and cold working on fatigue strength]. *Problemy prochnosti = Strength of Materials*, 1976, no. 5, pp. 25–27. (In Russian).

* Corresponding author

Mahalov Maxim S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev,

28 Vesennaya st.,

Kemerovo, 650000, Russian Federation

Tel.: +7-903-907-45-02, e-mail: maxim_ste@mail.ru

3. 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*, 2013, vol. 157 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/157/1/012013.
4. 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.
5. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
6. Kudryavtsev I.V. *Vnutrennie napryazheniya kak rezerv prochnosti v mashinostroenii* [Internal stresses as a strength reserve in mechanical engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 280 p.
7. Podzei A.V., ed. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya* [Technological residual stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 216 p.
8. Qin W.J., Dong C., Li X. Assessment of bending fatigue strength of crankshaft sections with consideration of quenching residual stress. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, iss. 3, pp. 938–947. DOI: 10.1007/s11665-016-1890-1.
9. 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.
10. 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.
11. Blyumenshtein V.Yu., Mahalov M.S. Raschetno-analiticheskaya model' mekhanicheskogo sostoyaniya poverkhnostnogo sloya uprochnennoi detali na stadii tsiklicheskogo nagruzheniya posle obrabotki razmernym sovmeshchennym obkатыvaniem [The hardened part surface layer mechanical state computational and analytical model at the cyclic loading stage after dimensional joint running-in]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2009, no. 3, pp. 33–39.
12. Sadasivam B., Hizal A., Arola D. Abrasive waterjet peening with elastic prestress: subsurface residual stress distribution. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2007 Conference Paper*, Seattle, WA, 2007, vol. 3. DOI: 10.1115/IMECE2007-43473.
13. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S. Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, iss. 5–8, pp. 667–678. DOI: 10.1007/s00170-012-4206-0.
14. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T., Chen Xi. A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, vol. 24, iss. 1, pp. 362–372. DOI: 10.1007/s11665-014-1280-5.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Martell J., Liu C., Shi J. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, iss. 9–12, pp. 1381–1392. DOI: 10.1007/s00170-014-6089-8.
20. 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.
21. Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process. *Manufacturing Technology*, 2017, vol. 54 (1), pp. 237–240.



22. Makhalov M.S., Blyumenstein V.Yu. Surface plastic deformation mechanics. The hardenable elastic-plastic body model. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, 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).

23. Blumenstein V.Yu., Mahalov M.S., Ostanin O.A. Simulation and calculation of residual stresses in mining machines components. *E3S Web Conferences, IIIrd International Innovative Mining Symposium*, 2018, vol. 41, art. 03012. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103012.

24. Papshev D.D. *Uprochnenie detalei obkatkoi sharikami* [Rolling balls parts hardening], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 132 p.

25. Blyumenshtein V.Yu., Mahalov M.S. Raschetnaya model' ostatochnykh napryazhenii uprochnennogo poverkhnostnogo sloya pri razmernom sovmeshchennom obkatyvani [The hardened surface layer residual stresses calculation model after dimensional joint running in]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2008, no. 5, pp. 50–58.

26. 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.

27. Smelyanskii V.M., Choudkhuri N.A. K voprosu prognozirovaniya ostatochnykh napryazhenii, vznikayushchikh v poverkhnostnykh sloyakh detalei pri obrabotke PPD [To the problem of the parts surface layers residual stresses predicting in the SPD processing]. *Sovershenstvovanie protsessov obrabotki i sborki detalei avtomobilya v usloviyakh primeneniya gibkikh avtomatizirovannykh kompleksov* [Improving the car parts processing and assembly processes in the flexible automated systems application conditions]. Moscow, MAMI Publ., 1987, pp. 3–16.

28. Smelyanskii V.M., Shaparin A.A., Choudkhuri N.A. [Numerical model of the parts surface layer residual stresses formation during rolling]. *Ostatochnye napryazheniya – rezerv prochnosti v mashinostroenii: tezisy dokladov Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Residual stress – strength reserve in mechanical engineering: All-Union scientific and technical conference abstracts]. Rostov-on-Don, 1991, pp. 7–9. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 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/>).