

УДК 621.787

DOI: 10.12737/article_5971e6e56cd3d8.31840363

В.Ю. Блюменштейн, д.т.н.
(ФГБОУ ВО Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)
E-mail: Blumenstein@rambler.ru

Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

На основе механики технологического наследования разработаны новые конструкции деформирующих инструментов, имеющих сложный рабочий профиль. Проведено МКЭ-моделирование процесса ППД мультирадиусным роликом и показана возможность накапливать большие значения деформаций без разрушения металла поверхностного слоя.

Ключевые слова: поверхностный слой; очаг деформации; напряженно-деформированное состояние; механика технологического наследования; метод конечных элементов; пластичность; гидростатическое давление.

V.Yu. Blyumenstein, D. Eng.
(FSBEI HE Gorbachev State Technical University of Kuzbass, 28, Vesennyya Str., Kemerovo, 650000, Russia)

Mechanics of technological inheritance as scientific basis of designing complex-profile tools for hardening treatment by surface plastic deformation

On the basis of technological inheritance mechanics there are developed new designs of deforming tools having a complex operation profile. The simulation with a finite element method (FEM) of the surface plastic deformation (SPD) process by a multi-radius roller is carried out and a possibility to accumulate large values of deformations without metal destruction of a surface layer is shown.

Keywords: surface layer; deformation source; stress-strain state; technological inheritance mechanics; finite element method; plasticity; hydrostatic pressure.

В условиях современного машиностроения постоянное внимание уделяется совершенствованию схем и методов механической обработки. Ключевое внимание уделяется повышению точности обработки и качества поверхностного слоя деталей машин. Сегодня не вызывает сомнения тот факт, что качество изделия закладывается на стадии проектных работ. Это предполагает перенос центра тяжести работ по созданию изделия с натурных испы-

таний опытных образцов или партий на математическое моделирование свойств изделий, а также моделирование процессов производства изделий, что позволяет обнаружить и устранить конструкторские и технологические дефекты еще до начала стадии производства.

Разработка новых инструментов и технологий основана, в первую очередь, на моделировании процессов механической обработки. Современные конечно-элементные программ-

ные продукты позволяют разрабатывать модели высокого качества, о чем свидетельствует их сравнение с экспериментальными тестами.

Так, в работе [1] представлены новые достижения в механической обработке твердых металлов, основанные на физике моделирования. Показано, что сокращение времени цикла при обеспечении качества зависит от физической модели операций по механической обработке твердого металла.

Знание физических закономерностей пластического течения металла позволило разработать и успешно применить на практике процессы резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [2]. Эффективность метода ОПД достигается путем целенаправленного изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя путем его предварительного деформирования, осуществляемого в процессе резания дополнительным механическим источником энергии.

Расчеты напряженно-деформированного состояния и оценка пластичности в очаге деформации позволили усовершенствовать схему деформирующе-режущего протягивания (ДРП) с опережающим пластическим деформированием [3]. Для устранения упругой усадки изделия (втулки) был разработан ряд способов деформирующе-режущего протягивания и протяжек с совмещением зон резания и деформирования с размещением режущих кромок в зоне контактной деформации. Это позволило снизить энергозатраты на процесс резания на 20 % по сравнению с деформирующе-режущим протягиванием с ОПД, а также суммарные энергозатраты на резание и деформирование на 10...14 %.

Развитие методов и технологий ППД связано с уточнением МКЭ-моделей, усложнением геометрии деформирующих инструментов, наложением термических и колебательных воздействий, учетом запаса пластичности металла и др.

Так, Ю.И. Сидякин с соавторами научные исследования, инженерные расчеты и проектирование процессов ППД проводят путем моделирования контактного взаимодействия индентора с обрабатываемым материалом и оценки упругопластической деформации [4].

В рамках научного направления С.А. Зайдеса исследуются и разрабатываются процессы охватывающего ППД, позволяющие обеспечивать точность и высокое качество поверхностного слоя деталей [5]. В упругопластической постановке разработана МКЭ-модель процесса, выполнены расчеты напря-

женно-деформированного состояния очага деформации. Математическое моделирование и последующие инженерные расчеты позволили создать теорию процесса, разработать технологические рекомендации и комплекс средств технологического оснащения, обеспечивающие заданные величины точности, упругости и остаточных напряжений исходя из назначенных условий эксплуатации маложестных валов.

Altan T. выполнил исследование механики процесса ППД, создав 2D и 3D МКЭ-модели обкатывания роликом [6]. Результаты моделирования, включая поверхностные деформации и остаточные напряжения, показали высокую сходимость с экспериментальными данными.

Смелянским В.М. разработана механическая теория процесса ППД, проведено моделирование напряженно-деформированного состояния очага деформации и установлены закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин. Установлено, что при обработке ППД возникает асимметричный очаг деформации (ОД), форма и размеры которого зависят от технологических факторов [7]. Движение частицы металла в ОД осуществляется по линии тока, взятой на определенной глубине и определяемой из решения задач механики твердого тела. Перемещаясь вдоль линии тока, эквидистантной профилю очага деформации, частица проходит через три состояния: начальное, текущее и конечное. Анализ модели позволил получить распределение компонент тензора напряжений, деформаций и скоростей деформаций и оценить влияние гидростатического давления на накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металла.

Одним из важных направлений развития технологий механической обработки, в том числе ППД, является создание в тонком поверхностном слое наноструктурированного состояния металла.

Киричек А.В. и Соловьев Д.Л. на основе физической модели разработали способ градиентной статико-импульсной обработки (СИО) ППД, использующий для пластического деформирования ударные волны, создающие высокое давление в очаге деформации и формирующие большую глубину упрочненного поверхностного слоя [8]. Выявлены измельченные частицы металла размером до 100...300 нм по всей толщине упрочненного образца; высокая концентрация наночастиц обнаружена в поверхностном слое на глубине 3...8 мм. Авторы показали, что способ дефор-

мационного упрочнения ударными волнами позволяет создавать гетерогенные ультрамелкозернистые градиентно-упрочненные структуры, чередующие твердые и пластичные участки по заданному закону.

Кузнецов В.П. с соавторами выполнили в динамике МКЭ-моделирование процесса выглаживания тонкого поверхностного слоя стального образца под внедряемым с постоянной силой и затем движущимся с постоянной скоростью индентором [9]. В условиях плоской деформации исследованы закономерности изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) материала и выявлены механизмы образования наноструктурированного слоя. Результаты исследований находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Одним из приоритетных направлений является разработка и реализация методов интенсивной пластической деформации (ИПД), особенностью которых является большое гидростатическое давление в очаге деформации [10 – 11]. Это позволяет достичь высоких пластических деформаций с обеспечением наноструктурированного состояния без разрушения металла; уникального сочетания таких свойств, как исключительно высокой прочности, так и пластичности при комнатной температуре.

Известно, что воздействие режущего и/или деформирующего инструмента на наноструктурированный металл поверхностного слоя приводит к пластическим и тепловым деформациям, что приводит к росту зерна и потере большинства полезных свойств. Поэтому уси-

лия исследователей направлены на сохранение этих свойств, в том числе, путем определения рациональных режимов механической обработки [12].

Анализ показал, что повышение эффективности (интенсификация) процессов «холодной» механической упрочняющей обработки возможно, в том числе, путем создания в очаге деформации сложного напряженно-деформированного состояния с преобладающими схемами с высоким гидростатическим давлением. В свою очередь, такие схемы реализуются инструментами, имеющими сложную геометрию и обеспечивающими определенную кинематику течения металла.

Теоретические исследования. Автором разработана теория формирования и трансформации наследуемого состояния поверхностного слоя в процессах обработки и эксплуатации – механика технологического наследования (ТН) [13]. В основе описания лежат представления о непрерывном накоплении деформаций и исчерпании запаса пластичности металла в поверхностном слое детали под влиянием программ нагружения. Жизненный цикл представлен стадиями резания, поверхностного пластического деформирования и усталостного нагружения, состоящего, в свою очередь, из двух стадий – циклической долговечности и циклической трещиностойкости.

Для решения задач механики ТН используют известные из механики деформируемого твердого тела параметры:

- показатель схемы напряженного состояния:

$$\Pi = \frac{\sigma}{T} = \frac{1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{6} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}; \quad (1)$$

- степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \left\langle \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^t \sqrt{\frac{1}{2} [(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2]} + \frac{3}{4} (\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2) \right\rangle dt; \quad (2)$$

- тензор остаточных напряжений:

$$[T\sigma_{ост}]_{ij} = [T\sigma_{деф}]_{ij} + [T\sigma_{паз}]_{ij} + [T\sigma_t]_{ij}; \quad (3)$$

- степень исчерпания запаса пластичности [14]:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = \Psi_1 + (\Psi_{21} + \Psi_{22}) = n\varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda + \left(\int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} - \varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_p^{n-1} d\Lambda \right), \quad (4)$$

где σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты тензора напряжений; $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_{xy}^2, \eta_{yz}^2, \eta_{zx}^2$ – компоненты тензора скоростей деформаций; $[T\sigma_{\text{деф}}]_{ij}$ – тензор напряжений нагрузки; $[T\sigma_{\text{раз}}]_{ij}$ – тензор напряжений разгрузки; $[T\sigma_t]_{ij}$ – тензор тепловых напряжений; Ψ_1 – составляющая, зависящая от напряжения текучести или от накопленной деформации; Ψ_2 – составляющая, зависящая от пластичности металла в условиях $\Pi = \text{const}$; Λ и Λ_p – накопленная и предельная степень деформации сдвига при данном показателе схемы напряженного состояния Π ; n – коэффициент деформационного упрочнения; φ_0 – коэффициент, определяемый на основе испытаний на пластичность. В неупрочненном металле $\Psi = 0$, а при полном исчерпании запаса пластичности $\Psi = 1$.

В качестве исходных характеристик металла используется кривая упрочнения $\sigma_s = \sigma_s(\Lambda)$, кривая предельной пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ и диаграмма циклической трещиностойкости $V = V(K)$ в координатах «коэффициент интенсивности напряжений K – скорость роста усталостной трещины V ».

В единых терминах и категориях выполнено решение задач механики на исследуемых стадиях и показано, что технологическое наследование проявляется в формировании наследственных программ нагружения в зависимости от наследственных очагов деформации (ОД), выступающих в качестве комплекса начальных и граничных условий при решении задач механики деформирования. Программа нагружения была представлена в координатах «показатель напряжённого состояния Π – накопленная степень деформации сдвига Λ ».

Выявлены закономерности пластического течения металла, накопления деформации, исчерпания запаса пластичности металла, формирования и трансформации поверхностного слоя по исследуемым стадиям нагружения, сформулированы правила технологического наследования. Результаты исследований позволили в процессах свободного ортогонального резания выявить, а в процессах ППД подтвердить наличие в очаге деформации трех участков квазимонотонной деформации, на границах которых деформация меняет знак.

В частности, при обработке ППД торковым роликом усилием $P = 2500$ Н установлено, что большая часть материала очага деформации находится в условиях сжатия, причем наибольшее значение среднего нормального напряжения соответствует зоне контакта инструмента с деталью. Наибольшие значения интенсивности касательных напряжений имеют место в зоне вершины волны перед деформирующим инструментом. При перемещении вглубь поверхностного слоя происходит уменьшение абсолютных значений, однако, характер распределения этих компонент прак-

тически не изменяется. Такой характер схемы нагружения приводит к тому, что наиболее интенсивно накопление деформаций происходит в передней зоне очага деформации. По мере упрочнения металла каждый последующий рабочий ход приводит к более «жестким» схемам нагружения, приводящим к накоплению предельных деформаций и полному исчерпанию запаса пластичности металла.

Результаты усталостных испытаний упрочненных ППД образцов показали, что исчерпание запаса пластичности до определенного предела полезно с точки зрения увеличения циклической долговечности [13]. В то же время это приводит к обратному эффекту на стадии циклической трещиностойкости, увеличивая скорость роста трещин и сокращая продолжительность этой стадии. Установлено, для каждого материала и каждой программы нагружения существует определенный уровень степени исчерпания запаса пластичности, начиная с которого происходит повышение интенсивности скорости роста трещин.

Таким образом, доступный диапазон изменения достигаемых при обработке ППД параметров механического состояния металла поверхностного слоя ограничен как исходными свойствами металла детали, так и допустимым диапазоном изменения технологических параметров режима обработки, к которым относится и форма профиля обкатного ролика.

При этом расширение технологических возможностей ППД возможно за счет создания схем обработки с большим гидростатическим давлением и количеством участков квазимонотонной деформации. Это приведет к накоплению больших деформаций при относительно невысоком исчерпании запаса пластичности без разрушения металла поверхностного слоя.

Результаты и обсуждение. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать новые конструкции деформирующих инстру-

ментов, имеющих сложный рабочий профиль [15 – 17]. Отличительными признаками предлагаемых конструкций являются: возможность варьирования в широких пределах геометрии рабочих профилей, как в радиальном, так и в осевом направлении; создание в очаге деформации больших натягов деформирующих элементов; создание сложного напряженного состояния с преимущественным большим гидростатическим давлением и получения больших деформаций с относительно низкой степенью исчерпания запаса пластичности металла.

Ролик обкатной мультирадиусный (МР-ролик) имеет форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов (ДЭ) с радиусами постоянной величины, находящимися относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлениях [17].

Оценка механического состояния очага деформации при обработке МР-роликом проводилась путем МКЭ-моделирования; моделируемый материал принимался изотропным с параметрами механического состояния, соответствующими параметрам стали 45 (ГОСТ 1050-88) в состоянии поставки. Была принята билинейная аппроксимация кривой течения, учитывающая упрочнение металла. Использовалась плоско-деформированная по-

становка; при этом процесс накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности моделировался в плоскости подачи, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки [18].

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали длиной $L = 50$ мм и высотой $h = 20$ мм (рис. 1). Как известно, плоскость главных деформаций располагается в меридиональном сечении цилиндрической заготовки – плоскости подачи [7]. Нижняя и боковые границы фрагмента жестко закреплялись по обеим осям. Размеры возникающего при обработке очага деформации значительно меньше моделируемого фрагмента, поэтому появляющиеся при такой постановке краевые эффекты вносят в результаты моделирования весьма незначительную погрешность.

Индентор моделировался как абсолютно жесткое тело и представлял собой окружность, моделирующую ролик заданного профильного радиуса. На материал поверхности детали, со свойствами, приведенными в таблице 1, воздействовал мультирадиусный ролик с профильными радиусами: $R_{пр1} = 1$ мм и натягом $h_{д1} = 0,05$ мм; $R_{пр2} = 1$ мм и натягом $h_{д2} = 0,1$ мм; $R_{пр3} = 1$ мм и натягом $h_{д3} = 0,15$ мм; $R_{пр4} = 3$ мм и натягом $h_{д4} = 0,05$ мм (рис. 2).

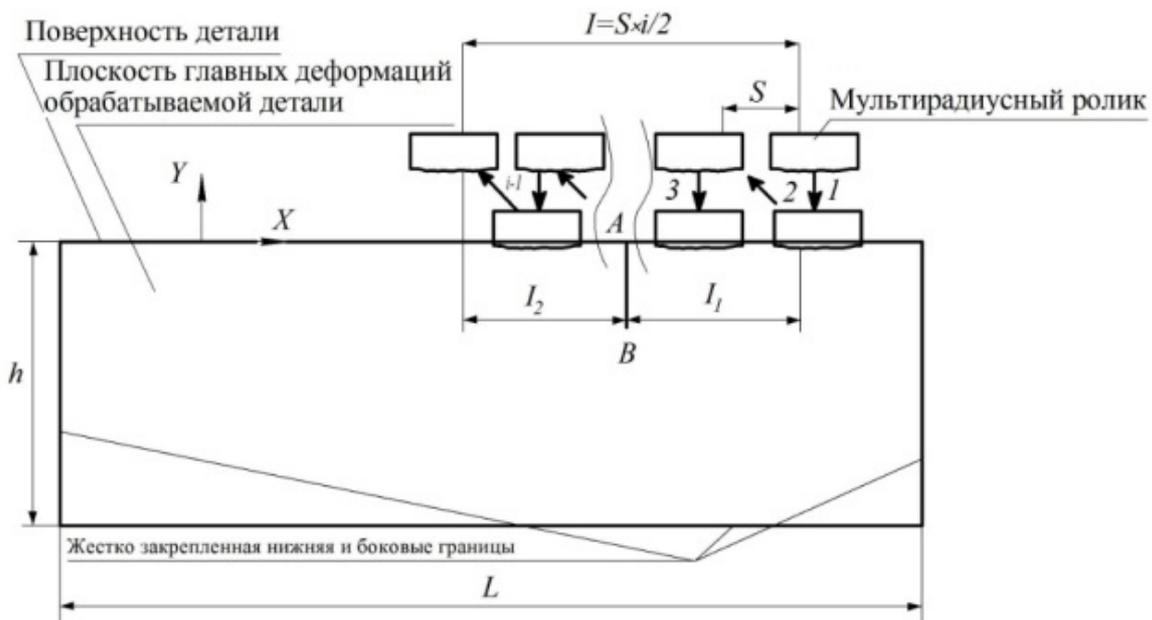


Рис. 1. Схема к постановке задачи МКЭ-моделирования

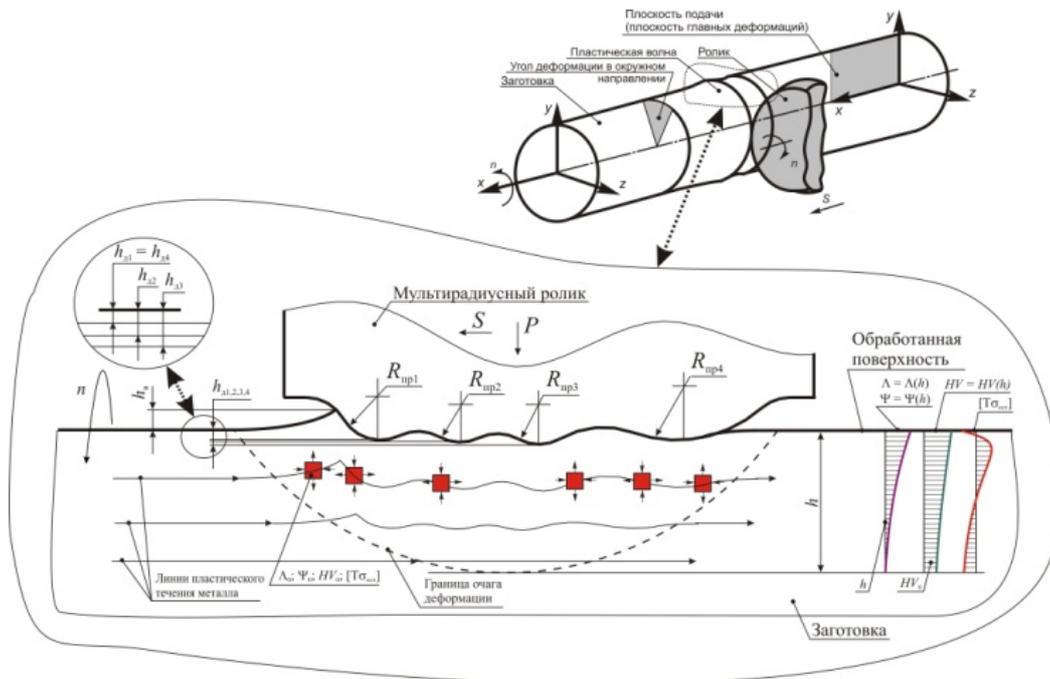


Рис. 2. Схема обработки ППД мультирадиусным роликом

Физические и механические свойства металла и параметры кривой течения (сталь 45, ГОСТ 1050-88, 160...180 HV)

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

В плоскости главных деформаций перемещение очага деформации в направлении подачи носит дискретный характер: новый ОД возникает со смещением относительно предыдущего на величину подачи.

В исходном положении индентор находился относительно поверхности с некоторым зазором. На первом и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности на некоторую величину, предполагающую внедрение и создание заданного при моделировании натяга. На втором и любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка – отвод индентора от поверхности на исходное расстояние с его одновременным перемещением вдоль поверхности на величину подачи.

Всего было смоделировано 340 шагов – 170 шагов нагружения и 170 шагов разгрузки. При этом длина обработанной поверхности в представленной модели составила $l = S \cdot n/2 = 15$ мм.

Таким образом, в процессе реализации всех шагов моделирования указанное сечение проходит через пространство очага деформации и является тем сечением по глубине обработанного поверхностного слоя, в котором произошло накопление деформаций, частичное исчерпание запаса пластичности и формирование тензора остаточных напряжений.

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

Для дальнейших расчетов накопленных параметров механического состояния угол деформации в окружном направлении был принят равным 10° , частота вращения детали равной 300 об/мин [7]. Таким образом, время одного оборота детали составило 0,2 с. Для принятого угла деформации в окружном направлении, время одного цикла, за который происходит нагрузка и разгрузка металла поверхностного слоя, составило 0,0054 с. При этом половину этого времени (0,0027 с) осуществляется нагружение и столько же – разгрузка.

В дальнейшем выполняли пересчет компонент тензоров напряжений и деформаций в координаты точек линий тока в очаге деформации [19].

На рис. 3 представлен профиль очага деформации, восстановленный по результатам МКЭ-моделирования. На рис. 4–7 приведено

распределение компонент напряженно-деформированного состояния вдоль линии данного профиля очага деформации; при этом абсциссы точек на графиках совпадают с абсциссами профиля.

Деформирующий элемент, первым входящий в контакт с исходным (необработанным) поверхностным слоем детали, имеет профильный радиус $R_{пр1} = 1$ мм и перемещается с натягом $h_{д1} = 0,05$ мм. В результате возникает ОД, по форме и размерам идентичный очагу деформации при ППД торцовым роликом.

Второй деформирующий элемент также имеет профильный радиус $R_{пр2} = 1$ мм и перемещается с натягом $h_{д2} = 0,1$ мм относительно исходной поверхности и натягом $0,05$ мм относительно первого деформирующего элемента. При этом происходит перекрытие зон пластического течения от действия первого и второго деформирующих элементов. Исходя из представлений о механике ППД в зоне этого перекрытия, происходит изменение схемы напряженного состояния, которое приводит к смене знака пластической деформации. Этот же эффект наблюдается во всех зонах, расположенных между соседними деформирующими элементами.

Третий деформирующий элемент с профильным радиусом также $R_{пр3} = 1$ мм перемещается с натягом $h_{д3} = 0,15$ мм относительно исходной поверхности и натягом $0,05$ мм относительно второго деформирующего элемента. Четвертый деформирующий элемент с профильным радиусом $R_{пр4} = 3$ мм перемещается с натягом $h_{д4} = 0,05$ мм относительно исходной поверхности и натягом $-0,05$ мм относительно третьего деформирующего элемента. Такая конструкция мультирадиусного ролика приводит к сложному напряженному состоянию металла, при котором происходит неоднократная смена знака пластической деформации.

Анализ результатов МКЭ-моделирования показал, что профиль очага деформации с достоверностью свыше 85 % совпадает с экспериментальным профилем, полученным методом профилографирования после быстрого отвода/отстрела МР-ролика от поверхности детали (рис. 3). Это говорит о корректности постановки МКЭ-модели и решения задачи по определению компонент тензоров напряжений и деформаций. Вторым важным выводом заключается в том, что в верхних зонах очага деформации металл находится в условиях сжатия

(рис. 4).

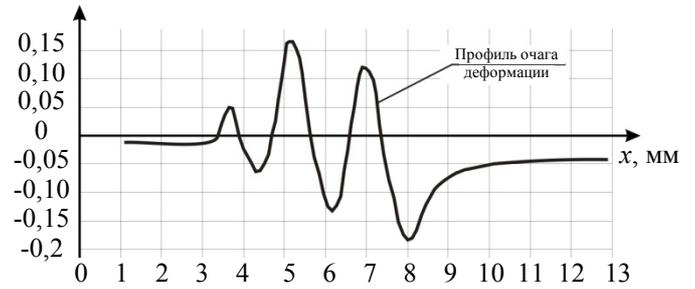


Рис. 3. Профиль очага деформации, восстановленный по результатам МКЭ-моделирования

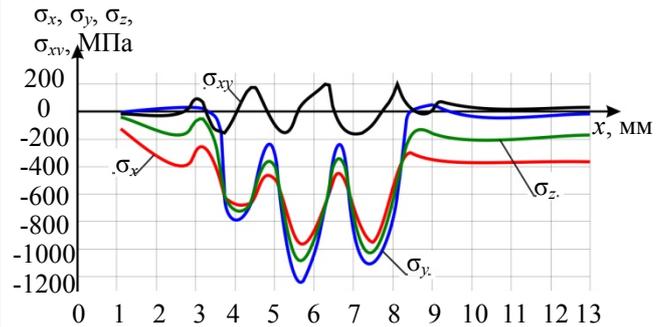


Рис. 4. Распределение компонент тензора напряжений

Компоненты тензора напряжений изменяются в соответствии с профилем деформирующих элементов МР-ролика. Компонент σ_x в зоне передней внеконтактной поверхности перед первым деформирующим элементом вначале снижается до уровня -380 МПа, затем увеличивается до -230 МПа в зоне вершины пластической волны. Компонент σ_y снижается до уровня -850 МПа, а компонент σ_{xy} вначале растет до $+75$ МПа, затем снижается до -85 МПа в зоне вершины пластической волны. В зоне передней контактной поверхности первого деформирующего элемента вначале происходит рост, снижение численного значения компонента σ_x до уровня -630 МПа, затем опять некоторый рост до -550 МПа в точке вершины профиля первого деформирующего элемента. В этой же зоне происходит непрерывное повышение компонента σ_y до значения -190 МПа, а компонента σ_{xy} до положительных значений $+175$ МПа.

В переходной зоне между первым и вторым деформирующими элементами в точках с абсциссами $4,2 \dots 5,2$ мм компонент σ_x растет, компонент σ_y снижается до -1300 МПа, а компонент σ_{xy} вначале снижается до -180 МПа, затем растет.

В передней контактной зоне второго деформирующего элемента происходит резкое сни-

жение компонента σ_x до значения -980 МПа, компонент σ_y начинает возрастать, а компонент σ_{xy} увеличивается до +200 МПа.

В переходной зоне между вторым и третьим деформирующими элементами, а также в контактной зоне третьего деформирующего элемента наблюдается качественно та же картина изменения компонент напряженного состояния.

В переходной зоне между третьим и четвертым деформирующими элементами происходит рост компонент σ_x и σ_y , а компонент σ_{xy} уменьшается.

Среднее нормальное напряжение повторяет тенденции изменения компонент напряженного состояния и показывает, что очаг деформации находится в условиях сжатия (рис. 5). При этом под вторым и третьим деформирующими элементами достигаются условия, при которых действует максимальное гидростатическое давление, достигающее 1150 МПа.

Третий важный вывод заключается в том, что ввиду сложной картины течения металла в тех же характерных зонах в соответствии с теми же тенденциями скорости деформации неоднократно меняют величины и знак (рис. 6).

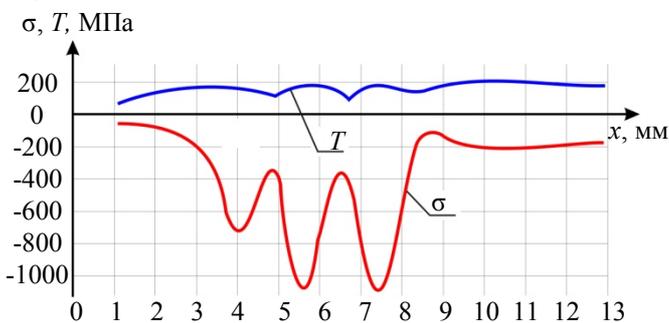


Рис. 5. Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений

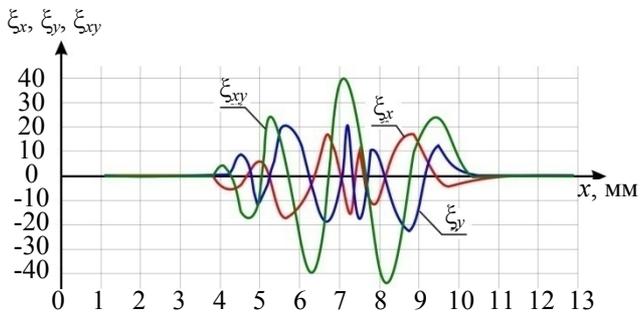


Рис. 6. Распределение компонент тензора скоростей деформации

Тем самым накопление степени деформации сдвига и истощения запаса пластичности металла происходят непрерывно при отрица-

тельном значении показателя схемы напряженного состояния (рис. 7). При этом даже при существенной накопленной деформации $\Lambda \approx 7$ вследствие благоприятной схемы деформирования степень истощения запаса пластичности не превышает значений $\Psi \leq 0,62$.

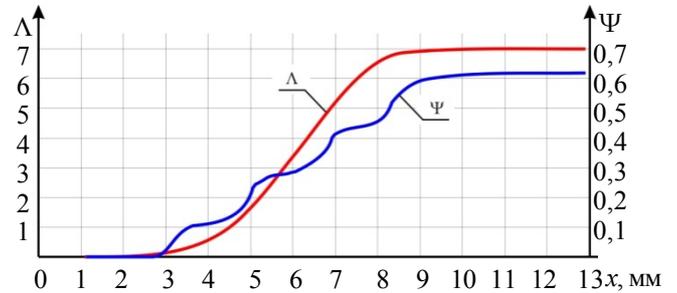


Рис. 7. Накопление степени деформации сдвига и изменение степени истощения запаса пластичности металла

Результаты исследований показали, что при обработке торцовым роликом традиционной конструкции:

- накопление предельной деформации $\Lambda \approx 1,24$ привело бы к предельному состоянию металла $\Psi = 1$ при профильном радиусе $R_{пр} = 1$ мм и натяге $h_d = 0,03$ мм;
- накопление предельной деформации $\Lambda \approx 1,24$ привело бы к предельному состоянию металла $\Psi = 1$ при профильном радиусе $R_{пр} = 3$ мм и натяге $h_d = 0,05$ мм;
- натяг $h_d = 0,15$ мм при профильном радиусе $R_{пр} = 1$ мм недопустим, т.к. при внедрении инструмента в течение нескольких оборотов детали приводит к нестационарному очагу деформации. Это заключается в катастрофическом росте пластической волны перед деформирующим инструментом и разрушению в районе ее вершины;
- обработка ППД с указанными натягами и профильными радиусами последовательно вторым, третьим и четвертым рабочими ходами приводит к накоплению предельных деформаций и полному истощению запаса пластичности металла уже после первого рабочего хода.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемая конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет накапливать большие значения деформаций без разрушения металла поверхностного слоя, что предоставляет дополнительные возможности по обеспечению, как циклической долговечности, так и циклической трещиностойкости.

Исследования микротвердости металла зо-

ны очага деформации и упрочненного поверхностного слоя, проведенные на приборе мод. Dura Skan 20, подтвердили полученные закономерности.

Выводы

1. Совершенствование схем и методов, разработка новых инструментов и технологий основана, в первую очередь, на моделировании процессов механической обработки. Современные конечно-элементные программные продукты позволяют разрабатывать модели высокого качества, о чем свидетельствует их сравнение с экспериментальными тестами. При этом качество расчетов определяется качеством физической модели, основанной на современных представлениях о механике деформируемого твердого тела.

2. Знание физических закономерностей пластического течения металла, расчеты напряженно-деформированного состояния и оценка накопленных деформаций и пластичности в процессе и по окончании обработки позволили разработать ряд уникальных методов и процессов, обеспечивающих высокое качество поверхностного слоя и, соответственно, высокую долговечность обрабатываемых деталей машин.

3. Повышение эффективности (интенсификация) процессов «холодной» механической упрочняющей обработки возможно, в том числе, путем создания в очаге деформации сложного напряженно-деформированного состояния с преобладающими схемами с высоким гидростатическим давлением. В свою очередь, такие схемы реализуются инструментами, имеющими сложную геометрию и обеспечивающими определенную кинематику течения металла.

4. Теория формирования и трансформации наследуемого состояния поверхностного слоя в процессах обработки и эксплуатации – механика технологического наследования (ТН), разработанная автором, использует представления о непрерывном накоплении деформаций и исчерпанию запаса пластичности металла в поверхностном слое детали под влиянием программ нагружения. Показано, что расширение технологических возможностей ППД возможно за счет создания схем обработки с большим гидростатическим давлением и количеством участков квазимонотонной деформации.

5. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать новые конструкции де-

формирующих инструментов, имеющих сложный рабочий профиль. Отличительными признаками предлагаемых конструкций являются: возможность варьирования в широких пределах геометрии рабочих профилей, как в радиальном, так и в осевом направлении; создания в очаге деформации больших натягов деформирующих элементов; создание сложного напряженного состояния с преимущественным большим гидростатическим давлением и получения больших деформаций с относительно низкой степенью исчерпания запаса пластичности металла.

6. Проведено МКЭ-моделирование процесса ППД мультирадиусным роликом, имеющим форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов с радиусами постоянной величины, расположенными относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлениях. Выявлена картина пластического течения металла в очаге деформации в условиях сложного напряженного состояния и показано, что рассматриваемая конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет накапливать большие значения деформаций без разрушения металла поверхностного слоя. В свою очередь, это предоставляет дополнительные возможности по обеспечению, как циклической долговечности, так и циклической трещиностойкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Marusich, T.D., Usui, S., Zamorano, L., Marusich, K., Leopold, J. New advances in the machining of hard metals using physics-based modeling (2013) *Engineering Transactions*, 61(1), pp. 3–13.
2. Ярославцев, В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях утилизации металлостружки. <http://technomag.bmstu.ru/doc/567548.html#> 07, июль 2013 DOI: 0.7463/0713.0567548.
3. Амбросимов, С.К. Определение технологических параметров процесса деформирующе-режущего протягивания с опережающим пластическим деформированием и упругопластическим нагружением зоны резания // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №8. – С. 3–7.
4. Сидякин, Ю.И., Осипенко, А.П., Бочаров Д.А. Совершенствование технологии отделочно-упрочняющей обработки валов поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №8. – С. 23–26.
5. Зайдес, С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 309 с.
6. T. Altan. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process [accessed Apr 18, 2017].

7. **Смелянский, В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

8. **Kirichek, A.V., Soloviyev, D.L.** Nanostructure changes in iron-carbon alloys as a result of impulse deformation wave action (2013) *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 5 (4), art. no. 04009.

9. **Kuznetsov, V.P., Smolin, I.Y., Dmitriev, A.I., Konov, D.A., Makarov, A.V., Kiryakov, A.E., Yurovskikh, A.S.** Finite element simulation of nanostructuring burnishing (2013) *Physical Mesomechanics*, 16 (1), pp. 62–72.

10. **Валиев, Р.З., Александров, И.В.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.

11. **Valiev, R.Z.** Nanostructured alloys: Large tensile elongation (2013) *Nature Materials*, 12 (4), pp. 289–291.

12. **Резание** металлов с объемной нано- и субмикрористаллической структурой [Текст]: монография/ А.И. Грабченко, Дж. Каптай, А.А. Симонова, А.П. Тарасюк, В.В. Драгобецкий, Н.В. Вerezub. – Харьков: Изд-во «Точка», 2012. – 217 с.

13. **Блюменштейн, В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

14. **Филиппов Ю.К.** Критерий оценки качества деталей, получаемых холодной объемной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 2. – С. 3–9.

15. **Пат. 2529335 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (2006.01)** Ролик обкатной комбинированный [Текст] / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А.; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – №2013135796/02; заявл. 30.07.2013;опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.

16. **Пат. 2530600 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (2006.01)** Ролик обкатной двухрадиусный [Текст] / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А.; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – №2013135794/02; заявл. 30.07.2013;опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.

17. **Пат. 2557377 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (2006.01)** Ролик обкатной мультирадиусный [Текст] / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Останин О.А.; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – №2013135795/02; заявл. 30.07.2013 ;опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.

18. **Махалов, М.С.** Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий / М. С. Махалов, В.Ю. Блюменштейн // Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С. 21–25.

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

REFERENCES

1. Marusich, T.D., Usui, S., Zamorano, L., Marusich, K., Leopold, J. New advances in the machining of hard metals using physics-based modeling (2013) *Engineering Transactions*, 61(1), pp. 3–13.

2. Yaroslavtsev, V.M. *Cutting with Leading Plastic Deformation in Technologies of Metal Chip Disposal*. <http://technomag.bmstu.ru/doc/567548.html#> 07, July, 2013 DOI: 0.7463/0713.0567548.

3. Ambrosimov, S.K. Technological parameters definition of deformation-cutting drawing process with leading plastic deformation and elasto-plastic loading of cutting area // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2008. – №8. – pp. 3–7.

4. Sidiyakin, Yu.I., Osipenko, A.P., Bocharov, D.A.Improvement of shaft finish-strengthening technology with surface plastic deformation // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2007. – №8. – pp. 23–26.

5. Zaides, S.A. *Female Surface Plastic Deformation*. – Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2001. – pp. 309.

6. T. Altan. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process [accessed Apr 18, 2017].

7. Smelyansky, V.M. Mechanics of Parts Strengthening with Surface Plastic Deformation. – М.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 300.

8. Kirichek, A.V., Soloviyev, D.L. Nanostructure changes in iron-carbon alloys as a result of impulse deformation wave action (2013) *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 5 (4), art. no. 04009.

9. Kuznetsov, V.P., Smolin, I.Y., Dmitriev, A.I., Konov, D.A., Makarov, A.V., Kirya-kov, A.E., Yurovskikh, A.S. Finite element simulation of nanostructuring burnishing (2013) *Physical Mesomechanics*, 16 (1), pp. 62–72.

10. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V. *Nano-structural Materials Obtained by Intensive Plastic Deformation*. М.: Logos, 2000. pp. 272.

11. Valiev, R.Z. Nanostructured alloys: Large tensile elongation (2013) *Nature Materials*, 12 (4), pp. 289–291.

12. *Cutting of Metals with Solid Nano- and Submicrocrystalline Structure* [Text]: monograph/ A.I. Grabchenko, J. Kaptay, A.A. Simonova, A.P. Tarasyuk, V.V. Dragobetsky, N.V. Verezub. – Kharkov: “Tochka” Publishing House, 2012. – pp. 217.

13. Blyumenstein, V.Yu., Smelyansky V.M. *Mechanics of Technological Inheritance at Stages of Machining and Operation of Machine Parts*. – М.: Mechanical Engineering-1, 2007. – pp. 400.

14. Filippov Yu.K. Criterion of quality assessment of parts manufactured by cold die forging // *Forging and Stamping Production*. – 1999. – № 2. – pp. 3–9.

15. Pat. 2529335 the Russian Federation, IPC V24V 39/04 (2006.01) Running-in Combined Roller [Text] / Blyumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S., Ostanin O.A.; applicant and patent holder: KuzSTU. – №2013135796/02; applied 30.07.2013; published. 27.09.2014, Bull. № 27.

16. Pat. 2530600 the Russian Federation, IPC V24V 39/04 (2006.01) Running-in Two-Radius Roller [Text] / Blyumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S., Ostanin O.A.; applicant and patent holder: KuzSTU. – №2013135794/02; applied 30.07.2013; published 10.10.2014, Bull. № 28.

17. Pat. 2557377 the Russian Federation, IPC V24V 39/04 (2006.01) Running-in Multi-Radius Roller [Text] / Blyumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S., Ostanin O.A.; applicant and patent holder: KuzSTU. – №2013135795/02; applied 30.07.2013 ; published 20.07.2015, Bull. № 20.

18. Makhalov, M.S. Simulation of residual stresses at stages of product life cycle / M. S. Makhalov, V.Yu. Blyumenstein // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2014. – №12. – pp. 21–25.

19. Krechetov, A.A. Procedure of Parameter Computation of Mechanical State of Machine Parts Surface Layer // *Bulletin of KuzSTU*. – 2001. – №5. – pp. 27–31.

Рецензент д.т.н. Д.Л. Соловьев