УДК 621.787.4 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-73-76

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАПЛЫВА И ПОДЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ УПРОЧНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ТОРОИДАЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Зайдес С.А, Фам М.Ч.
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, роликовое обкатывание, внеконтактная деформация, упругопластические волны, упругое восстановление, дифференциальный тороидальный инструмент.
Аннотация. Методом конечно-элементного моделирования в Ansys 19.2 определены размеры волны перед инструментом и подъёма материала за ним при упрочнении цилиндрических деталей из черных и цветных металлов дифференциальным тороидальным инструментом, совмещающим процессы качения и качения с проскальзыванием. Установлено влияние физико-механических свойств материалов на параметры волнообразования и упругого восстановления.

DETERMINATION OF THE PILE-UP AND SPRING BACK DURING HARDENING OF CYLINDRICAL PARTS WITH A DIFFERENTIAL TOROIDAL TOOL

Zaides S.A, Pham M.C.
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

Keywords: surface plastic deformation, roller burnishing, out-of-contact deformation, elastoplastic waves, elastic recovery, differential toroidal tool.
Abstract. By finite element modeling in Ansys 19.2, the dimensions of the wave ahead of the tool and the material rise behind it were determined during hardening of cylindrical parts made of ferrous and non-ferrous metals with a differential toroidal tool combining rolling and rolling with slipping. The influence of the physical and mechanical properties of materials on the parameters of wave formation and elastic recovery was established.

Метод поверхностного пластического деформирования (ППД), в частности роликовое обкатывание, является типичным представителем финишных операций, которые широко применяются в машиностроении благодаря своей простоте и высокой эффективности [1-3]. При роликовом обкатывании пластическое течение металла возникает не только в направлении продольной подачи, но и в обратном направлении.

Анализ контактных и внеконтактных зон при ППД позволяет изучать закономерности пластического волнообразования, оценивать его влияние на изменение площади контакта инструмента с заготовкой и выявлять возможные дефекты поверхности, а исследование упругого восстановления материала после снятия нагрузки - оценивать его вклад в формирование окончательных размеров заготовки и точность обработки [1].

Целью данной работы является определение размер волны перед инструментом и подъема за инструментом при упрочнении цилиндрических деталей из разных черных и цветных металлов дифференциальным ППД.

Упрочнение цилиндрических деталей дифференциальным ППД

Для повышения эффективности упрочнения и улучшения параметров шероховатости цилиндрических поверхностей в ИРНИТУ предложена отделочно-упрочняющая обработка дифференциальным тороидальным инструментом. Отличительной особенностью данной технологии является комбинирование в зоне пластической деформации двух кинематических режимов – качения и качения с проскальзыванием [2].

Предлагаемый способ (рис. 1) реализуется с помощью двух соосных роликов 1 и 2. Заготовка 3 при этом вращается вокруг своей оси с частотой $n_{заг}$, а инструмент, нагруженный усилием P (что обеспечивает радиальное внедрение на глубину t), перемещается вдоль оси с продольной подачей $S_{пр}$. Ролик 1, имеющий меньший профильный радиус r_1, первым вступает в контакт с поверхностью детали. В зоне контакта, вращаясь с частотой n_1, он создаёт очаг деформации и упрочняет поверхность по схеме качения с проскальзыванием. Ролик 2, профильный радиус которого $r_2 > r_1$, вращается пассивно за счёт сил трения от заготовки и осуществляет упрочнение и сглаживание микронеровностей в режиме чистого качения. Благодаря такой схеме в зоне обработки формируются две независимые контактные площадки, что позволяет целенаправленно изменять соотношение скоростей роликов и, соответственно, управлять степенью проскальзывания.

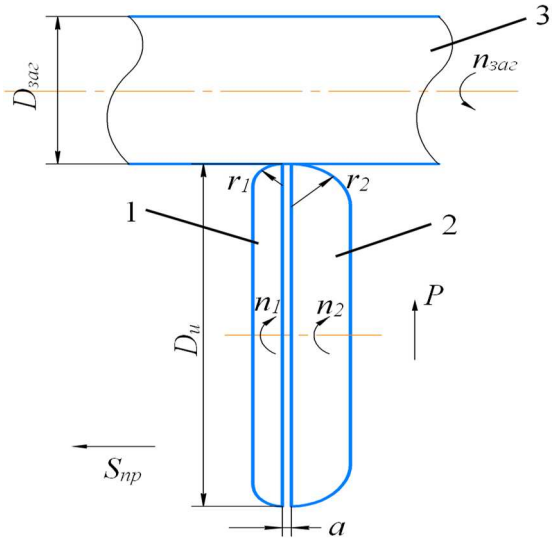


Рис. 1. Схема ППД с использованием дифференциального тороидального инструмента: 1 – ролик с меньшим радиусом r_1; 2 – ролик с большим радиусом r_2; 3 – заготовка

Компьютерное моделирование

В данной работе для количественной оценки волнообразования перед рабочим инструментом и подъем материала за ним использован программный комплекс Ansys 19.2.

Расчетная модель включала следующие параметры: материал заготовки - сталь 45 (упругопластическая, упрочняемая), модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$, предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 600$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1450$ МПа; диаграмма деформирования – билинейная.

Базовые параметры для моделирования включают параметры заготовки (диаметр $D_{заг} = 30$ мм и частота вращения $n_{заг} = 300$ об/мин), геометрию дифференциального тороидального инструмента (диаметр $D_{и} = 50$ мм, профильные радиусы роликов $r_1 = 2$ мм и $r_2 = 4$ мм, межвершинное расстояние $a = 3$ мм), а также частоты вращения роликов $n_1 = 170$ об/мин и $n_2 = 180$ об/мин), режимы обработки (радиальный натяг $t = 0{,}1$ мм и продольная подача $S_{пр} = 0{,}1$ мм/об), причём деформирующий инструмент принят абсолютно жестким, поскольку его упругие деформации пренебрежимо малы по сравнению с деформациями заготовки.

Результаты компьютерного моделирования их обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты моделирования радиального перемещения поверхности заготовки при базовых технологических режимах, где h – отклонение от исходной плоскости обработки (на исходной поверхности $h = 0$).

Из результатов моделирования видно, что при глубине внедрения инструмента 0,1 мм перед первым роликом формируется волна материала с высотой вершины до 0,023 мм. В то же время после прохода второго ролика поверхность восстанавливается на величину около 7,87 мкм и формируется стабильная поверхность после обработки.

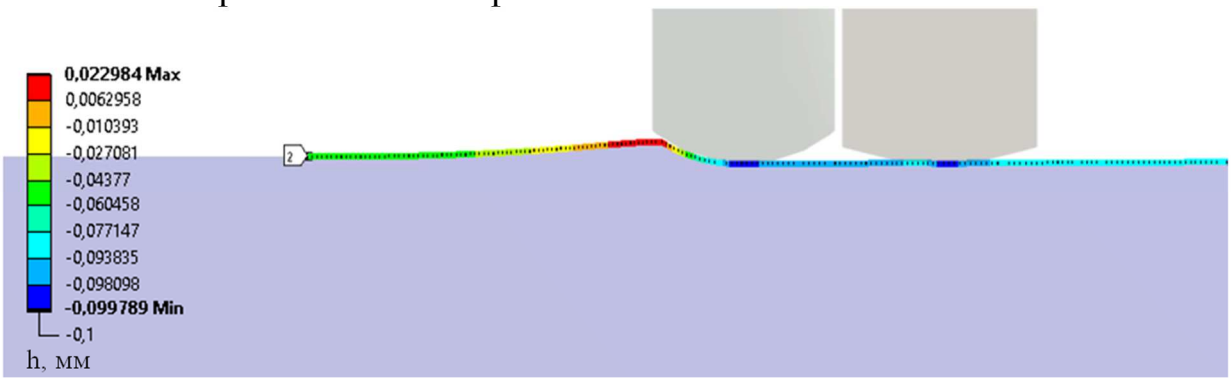


Рис. 2. Радиальное перемещение поверхности заготовки при базовых технологических режимах

Табл. 1. Высота волны и величина подъема за инструментом при упрочнении некоторых черных и цветных металлов

Материалы	Алюминиевый сплав АМг6Н	Титановый сплав ВТ6	Медный сплав Л90	Нержавеющая сталь 08Х18Н10	Конструкционная сталь 45
Модуль упругости E, ГПа	71	96	105	193	200
Предел текучести, σ_T, МПа	280	930	110	210	360
Отношение σ_T/E	3,94	9,69	1,05	1,09	1,80
Высота волны h, мкм	34,2	31,1	29,3	26,4	23,0
Подъем за инструментом Δ, мкм	11,44	23,13	2,22	3,27	7,87

Для установления влияния физико-механических свойств материалов на размеры волны и величину подъёма были моделированы процессы упрочнения заготовок из разных материалов, результаты которых представлены в таблице 1. При одинаковых условиях обработки наибольшие размеры волн достигаются при обработке материалов с более низким модулем упругости E, таких как алюминиевый и титановый сплавы, за которыми следует медный сплав. В то же время размеры волн при обработке нержавеющих и конструкционных сталей оказываются в 1,36…1,72 раза меньше. Размеры волн в данном случае главным образом зависят от модуля упругости материала E. При одинаковой величине внедрения инструмента в заготовку, чем более пластичным является материал, тем большие размеры волн образуются. Это указывает на то, что механические характеристики материала определяют не только геометрию волнообразования, но и упругое поведение поверхностного слоя после снятия нагрузки.

Для количественной оценки упругого последействия было проанализировано соотношение σ_T/E, сопоставление с которым приведено в таблице 1. Наибольшая упругая разгрузка Δ зафиксирована для титанового сплава ВТ6, обладающего высоким пределом текучести и низким модулем упругости. По мере уменьшения отношения σ_T/E – при переходе к алюминиевому сплаву, стали 45, нержавеющей стали и, наконец, к медному сплаву Л90 – величина Δ закономерно снижается и оказывается в 10,4 раза ниже, чем у ВТ6. Полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии соотношения предела текучести и модуля упругости на способность материала к упругому восстановлению в условиях поверхностно-пластического деформирования. Хотя строгая аналитическая зависимость между σ_T/E и упругим восстановлением при роликовом обкатывании пока не установлена, результаты численного моделирования позволяют рассматривать данное соотношение как информативный критерий для сравнительной оценки поведения различных материалов.

Список литературы

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Патент №2860686 РФ. Способ поверхностного пластического деформирования / С.А. Зайдес, М.Ч. Фам. – Заявка № 2025123460 от 26.08.2025; опубл. 21.04.2026.
3. Зайдес С.А., Фам М.Ч., Тютрин Н.О. Влияние геометрии дифференциального тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2026. – №5(179). – С. 10-20. – DOI: 10.30987/2223-4608-2026-5-10-20.

Сведения об авторах:

Зайдес Семен Азикович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий;

Фам Мань Чинь – аспирант.