

Оценка внеконтактной деформации при упрочнении цилиндрических деталей геликоидным инструментом

С.А. Зайдес^а, К.Х. Ву^б, Ю.В. Димов^с

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, г. Иркутск, Россия

^а zsa@istu.edu, ^б vuquangkhai98hp@gmail.com, ^с Dimov-Ura@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, ^б <http://orcid.org/0009-0000-2938-8369>, ^с <https://orcid.org/0009-0000-7023-3078>

Статья поступила 12.03.2026, принята 28.04.2026

Цель работы заключается в установлении закономерностей влияния режимов геликоидного поверхностного пластического деформирования (ППД) на параметры внеконтактной деформации для обеспечения качества поверхности и точности диаметральных размеров цилиндрических деталей после упрочнения. С использованием компьютерного моделирования ANSYS Workbench 19.2 проведены расчёты по определению размеров упругопластических волн и подъёма поверхностного слоя в зависимости от параметров и режимов геликоидного ППД. Установлено, что радиальный натяг является основным технологическим параметром, влияющим на линейные размеры упругопластических волн и величину подъёма поверхности, максимальные значения которых достигаются при натяге $t = 0,5$ мм, а дальнейшее его увеличение приводит к их снижению вследствие пере-наклёпа материала. Определено, что увеличение продольной подачи вызывает рост высоты упругопластических волн перед первым витком и между ними и снижение высоты волны за вторым витком, что сопровождается уменьшением остаточного подъёма поверхностного слоя. Выявлено, что изменение частоты вращения рабочего инструмента в диапазоне от 100 до 200 об/мин приводит к увеличению высоты упругопластических волн, и при дальнейшем росте частоты вращения их размеры стабилизируются. Влияние частоты вращения заготовки на параметры волн и подъём поверхности незначительно. Также установлено, что физико-механические свойства материала детали существенно влияют на высоту упругопластической волны и подъём металла после обработки: материалы с меньшим модулем упругости характеризуются большими значениями высоты волны и подъёма поверхностного слоя после упрочнения. Установлено, что интенсивности временных напряжений в вершинах упругопластических волн варьируются в интервале 256,34–376,78 МПа (меньше предела прочности $\sigma_B = 600$ МПа) и не приводят к разрушению поверхностного слоя. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров упрочняющей обработки, для обеспечения точности диаметральных размеров деталей при упрочнении и повышении качества поверхностного слоя деталей машин.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование; упругопластические волны; пластическая деформация; внеконтактная деформация; подъём поверхностного слоя.

Assessment of non-contact deformation during the strengthening of cylindrical components using a helicoidal tool

S.A. Zaides^а, Q.K. Vu^б, Yu.V Dimov^с

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^а zsa@istu.edu, ^б vuquangkhai98hp@gmail.com, ^с Dimov-Ura@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, ^б <http://orcid.org/0009-0000-2938-8369>, ^с <https://orcid.org/0009-0000-7023-3078>

Received 12.03.2026, accepted 28.04.2026

The objective of this study is to establish patterns of influence of helicoidal surface plastic deformation (SPD) modes on non-contact deformation parameters to ensure surface quality and diametrical accuracy of cylindrical parts after hardening. ANSYS Workbench 19.2 computer modeling is used to perform calculations to determine the dimensions of elastoplastic waves and surface layer heave depending on the parameters and modes of helicoidal SPD. It is established that radial interference is the main process parameter influencing the linear dimensions of elastoplastic waves and the magnitude of surface heave, the maximum values of which are achieved at an interference of $t = 0,5$ mm, while its further increase leads to a decrease in these dimensions due to material overhardening. It is determined that an increase in longitudinal feed causes an increase in the height of elastoplastic waves before and between the first turn, and a decrease in the wave height behind the second turn, which is accompanied by a decrease in the residual heave of the surface layer. It is revealed that changing the rotational speed of the working tool in the range from 100 to 200 rpm leads to an increase in the height of elastoplastic waves, and with a further increase in the rotational speed, their sizes stabilize. The effect of the workpiece rotational speed on the wave parameters and surface heave is insignificant. It is also established that the physical and mechanical properties of the part material significantly affect the height of the elastoplastic wave and the heave of the metal after processing: materials with a lower modulus of elasticity are characterized by greater values of the wave height and the heave of the surface layer after hardening. It is found that the intensities of temporary stresses at the peaks of elastoplastic waves vary in the range of 256,34–376,78 MPa (less than the tensile strength $\sigma_B = 600$ MPa) and do not lead to the destruction of the surface layer. The obtained results can be used to optimize the parameters of hardening treatment, to ensure the accuracy of the diametrical dimensions of parts during hardening and to improve the quality of the surface layer of machine parts.

Keywords: surface plastic deformation; elastoplastic waves; plastic deformation; non-contact deformation; surface layer uplift.

Введение. Поверхностное пластическое деформирование применяется для повышения эксплуатационных свойств деталей машин за счёт упрочнения поверхностного слоя. В процессе упрочняющей обработки в материале формируется наклёпанная структура, снижается шероховатость поверхности и создаются остаточные сжимающие напряжения, что приводит к повышению усталостной прочности, износостойкости поверхностного слоя и сопротивлению образованию микротрещин. В результате увеличивается срок службы деталей и надёжность работы машин механизмов [1–3].

В процессе упрочняющей обработки методом ППД принято выделять две составляющие очага деформации: зону внедрения инструмента и сопряжённую с ней область внеконтактной деформации. Вторая зона охватывает объёмы металла, находящиеся за пределами фактического пятна контакта, и существенно влияет на итоговые физико-механические свойства поверхностного слоя. Внеконтактная деформация подразделяется на два основных вида: деформация, реализуемая в процессе воздействия рабочего инструмента, и деформация, проявляющаяся после его удаления из зоны обработки, то есть при отсутствии непосредственного силового воздействия и сопровождающаяся подъёмом поверхностного слоя материала [4–5].

Образование волны при ППД – это физическое явление самого процесса, причины его возникновения заключаются в том, что давление инструмента на заготовку превышает предел текучести материала, и перед зоной контакта инструмента с обрабатываемой деталью формируется валик внеконтактной деформации. Если объём вытесненного металла не успевает перераспределиться по обрабатываемой поверхности, он превращается в устойчивую волну. Негативное влияние упруго-пластической волны проявляется лишь при нарушении рациональных режимов обработки, в частности при чрезмерных нагрузках и скоростях, когда избыточная интенсивность волнового воздействия приводит к перенаклёпу поверхностного слоя, возникновению микротрещин и снижению размерной стабильности обработанной поверхности [6–8].

Второй вид внеконтактной деформации возникает после прохождения рабочего инструмента, при этом в поверхностном слое происходит подъём металла. Подъём металла не следует рассматривать как дефект, а как закономерное проявление механизма упрочнения, сопровождающего процессы поверхностного пластиче-

ского деформирования методами обкатки и выглаживания. Он влияет на точность размеров и форму поверхности, так как изменяет фактические геометрические параметры детали после обработки. Возможность предварительного прогнозирования величины подъёма и учёта его при разработке технологического процесса позволяет обеспечить требуемую точность геометрических параметров упрочняемых деталей [9–11].

Метод поверхностно-пластического деформирования обеспечивает различную величину подъёма материала в зависимости от применяемого способа обработки. В типичных случаях при роликовой обкатке увеличение диаметра может составлять от 0,01 до 0,10 мм, а при повышенных нагрузках и особых условиях – даже превышать эти значения [12–14].

На параметры внеконтактной деформации существенное влияние оказывают кинематические и силовые условия процесса [15]. В работе [16] авторы определили величину внеконтактной деформации при маятниковом ППД. Установлено, что при малой величине натяга ($t = 0,1–0,2$ мм) подъём металла после маятникового ППД составляет 1,3–2,3 мкм.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработан новый способ упрочнения деталей с применением геликоидного инструмента. При этом деформирующий элемент перемещается по геликоидальной траектории, что обеспечивает одновременное воздействие нормальных и касательных напряжений в зоне контакта и формирует характерную упругопластическую волновую структуру [17].

Цель работы – определить влияние режимов геликоидного ППД на линейные размеры упругопластических волн и величину подъёма поверхностного слоя, а следовательно, обеспечить точность диаметральных размеров деталей после обработки геликоидным ППД.

Моделирование процесса геликоидного ППД. Данный способ был разработан с целью интенсификации напряжённого состояния обработанной поверхности и расширения технологических возможностей при локальном поверхностном пластическом деформировании. Для выполнения поставленной цели применили рабочий инструмент в виде геликоида с винтовой формой профиля рабочей поверхности, состоящей из двух рабочих витков [18].

На рис. 1 представлена кинематическая схема геликоидного ППД и конечно-элементная модель процесса упрочнения (б): 1 – трёхкулачковый патрон; 2 – заготовка; 3 – задняя бабка; 4 – рабочий инструмент

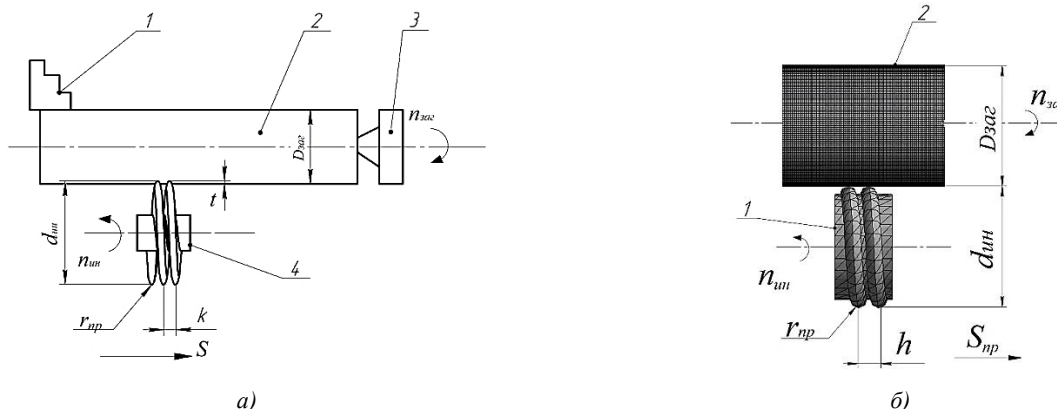


Рис. 1. Кинематическая схема геликоидного ППД (а) и конечно-элементная модель процесса упрочнения (б): 1 – трёхкулачковый патрон; 2 – заготовка; 3 – задняя бабка; 4 – рабочий инструмент

В процессе моделирования геликоидного поверхностного пластического деформирования учтены следующие параметры рабочего инструмента и заготовки. Рабочий инструмент рассмотрен как абсолютно жёсткое тело с профильным радиусом $r_{пр} = 2$ мм, межвитковым шагом $h = 5$ мм и диаметром $d_{ин} = 30$ мм. Количество витков – два.

В качестве заготовки использован цилиндр диаметром $D_{заг} = 30$ мм, изготовленный из конструкционной стали 45. Для материала заготовки приняты следующие механические характеристики: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, диаграмма деформирования билинейного типа с пределом текучести $\sigma_T = 360$ МПа, пределом прочности $\sigma_B = 600$ МПа и модулем упрочнения $E_t = 1,45 \cdot 10^3$ МПа.

Критическое условие по интенсивности касательных напряжений (Губера-Мизеса): $\tau_i \leq \tau_{кр} = \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}}$, где σ_B – предел прочности материала ($\sigma_B = 600$ МПа), отсюда следует что величина интенсивности касательных напряжений τ_i должна быть меньше 346 МПа.

В процессе моделирования была использована конечно-элементная сетка, сформированная из тетраэдрических элементов. С применением CAD/CAE-системы ANSYS 19.2 была создана конечно-элементная модель цилиндрического образца со следующими характеристиками: размер конечного тетраэдрического элемента составлял 0,5 мм, а коэффициент трения в зоне контакта равен $f = 0,2$. Приняты следующие базовые режимы упрочнения: частота вращения рабочего инструмента $n_{ин} = 100$ об/мин, частота вращения заготовки $n_{заг} = 100$ об/мин, радиальный натяг $t = 0,5$ мм, продольная подача $S = 0,1$ мм/об.

Типичное значение коэффициента трения при моделировании поверхностного пластического деформиро-

вания находится в диапазоне 0,2–0,3 при моделировании металлических поверхностей в условиях сухого трения или минимального смазывания [19]. В работе [16] авторы применили коэффициент трения 0,2 при моделировании процесса упрочнения маятниковым ППД, при котором поочередно действуют процессы качения и скольжения.

Величина радиального натяга была выбрана намеренно завышенной ($t = 0,5$ мм), чтобы более детально проследить динамику изменения геометрии упругопластических волн и проанализировать их напряжённо-деформированное состояние в области внеконтактной деформации.

На рис. 2 показан схематично профиль очага деформации при геликоидном ППД. Отмечено, что в процессе геликоидного упрочнения возникают три упругопластических волны. Перед рабочим инструментом образуется упругопластическая волна A_1 с высотой h_1 , а в пространстве между двумя витками образуется упругопластическая волна A_2 с высотой h_2 . За вторым витком формируется упругопластическая волна A_3 с высотой h_3 . Пунктирными линиями обозначено положение профиля поверхности детали спустя некоторое время после прохождения инструмента, тогда как сплошная линия соответствует отпечатку в рассматриваемый момент времени.

После прохождения геликоидного инструмента в поверхностном слое происходит характерный подъём материала (Δh), который отражает взаимодействие упругих и пластических свойств металла. Этот подъём возникает вследствие локальной пластической деформации материала в зоне контакта с рабочим инструментом и последующего частичного упругого восстановления после него.

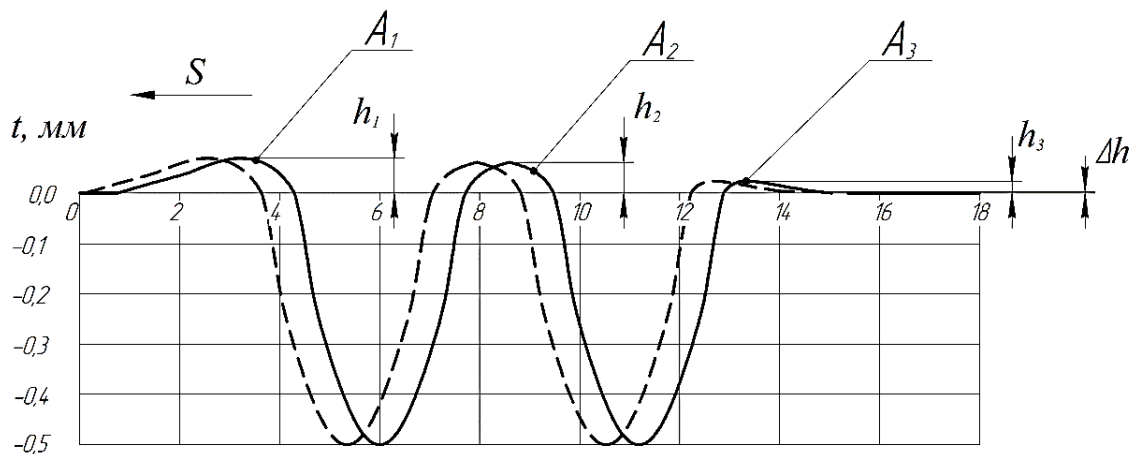


Рис. 2. Схема профиля очага деформации при геликоидном ППД

Результаты моделирования

Влияние основных параметров геликоидного ППД на линейные размеры упругопластических волн. В данной работе рассматриваются только размеры упругопластических волн в продольном направлении, так как размеры волн в этом направлении значительно больше по сравнению с размерами волн в поперечном направлении [20]. При этом наибольшие напряжения возникают в вершинах упругопластических волн, поэтому в данной

работе исследуются именно высотные размеры упругопластических волн.

На рис. 3 показаны величины высот упругопластических волн в зависимости от режимов геликоидного упрочнения.

Из рис. 3, а следует, что при величине радиального натяга $t = 0,5$ мм, высота волны достигает максимального значения, а при t свыше 0,5 мм они падают. Это объясняется тем, что при дальнейшем увеличении

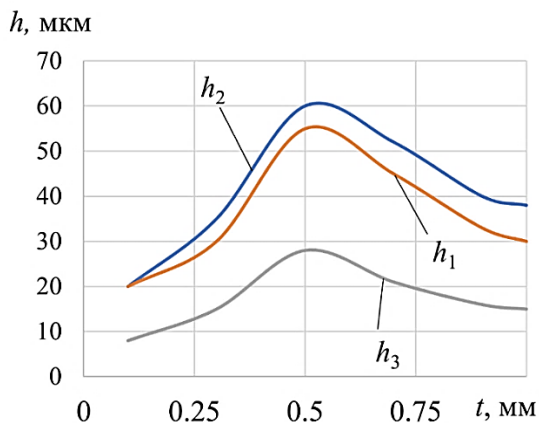
натяга происходит процесс перенаклепа, в результате которого материал становится более хрупким. Максимальная высота h_1 (A_1) составляет $h_{1\max} = 55$ мкм, h_2 (A_2) составляет $h_{2\max} = 60$ мкм, h_3 (A_3) составляет $h_{3\max} = 28$ мкм.

Рис. 3, б иллюстрирует изменение высоты волн от величины продольной подачи рабочего инструмента (S) и показывает, что с увеличением продольной подачи высоты упругопластических волн h_1 и h_2 возрастают. При подаче $S = 0,1$ мм/об высоты волн h_1 и h_2 составляют, соответственно 50 и 55 мкм, тогда как при $S = 0,6$ мм/об она увеличивается, соответственно, до 75 и 79 мкм. Это объясняется тем, что при увеличении продольной подачи за единицу времени в зону перед рабочим инструментом вовлекается больший объём материала, который не успевает полностью разгрузиться после предыдущего прохода инструмента, что приводит к увеличению высоты волны перед инструментом. В то же время при увеличении продольной подачи от 0,1 мм/об до 0,6 мм/об высота волны h_3 снижается от 29 до 16 мкм.

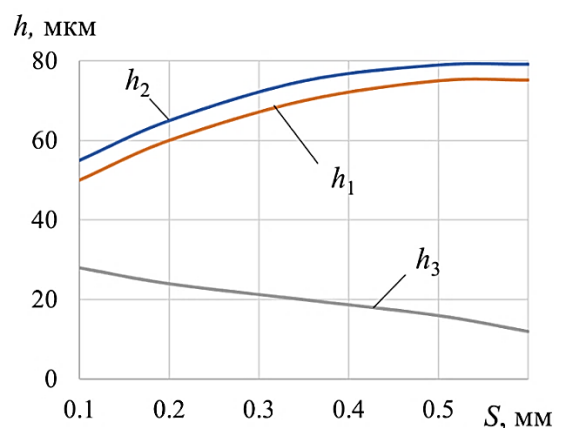
На рис. 3, в представлена зависимость высоты упругопластических волн от частоты вращения рабочего инструмента ($n_{\text{ин}}$). Как видно из графика, при изменении частоты вращения от 100 до 200 об/мин, высоты волн увеличиваются. В частности, высота волны h_1 увеличивается с 52 до 68 мкм, высота волны h_2 – с 55 до 73 мкм, а высота волны h_3 – с 29 до 36 мкм. При дальнейшем увеличении частоты вращения рабочего инструмента

высоты упругопластических волн не претерпевают значительных изменений. Это объясняется тем, что при вращении рабочего инструмента за счёт его винтовой геометрии создаётся дополнительная составляющая сдвига. Чем больше $n_{\text{ин}}$, тем больше величина этой составляющей сдвига вдоль поверхности детали. При $n_{\text{ин}} < 200$ об/мин увеличение частоты вращения рабочего инструмента повышает интенсивность циклического нагружения и приводит к увеличению высоты упругопластических волн. При $n_{\text{ин}} > 200$ об/мин за один шаг продольной подачи материал испытывает достаточно большое число одинаковых нагружений, вследствие чего пластическая деформация по оси достигает предельного значения. Поэтому высоты волн остаются практически постоянными.

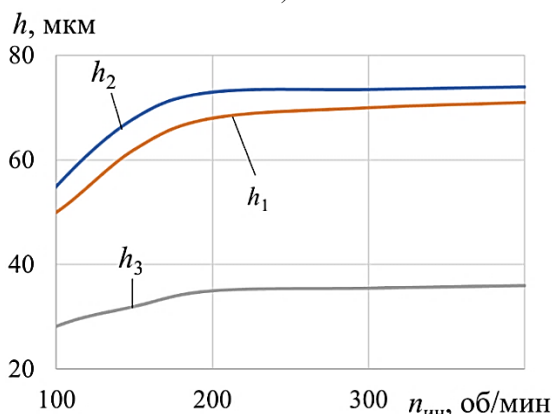
На рис. 3, г показано, что высоты упругопластических волн остаются практически постоянными при частоте вращения заготовки $n_{\text{заг}}$ от 50 до 300 об/мин. Так, высота волны h_1 колеблется в пределах от 50 до 52 мкм, высота волны h_2 – от 55 до 56 мкм, а высота волны h_3 – от 27 до 28 мкм. Это свидетельствует о том, что увеличение частоты вращения заготовки не оказывает значительного влияния на величину волны в процессе ППД. Такое поведение внеконтактной деформации указывает на стабильность механизма образования упругопластической волны несмотря на увеличение частоты вращения заготовки.



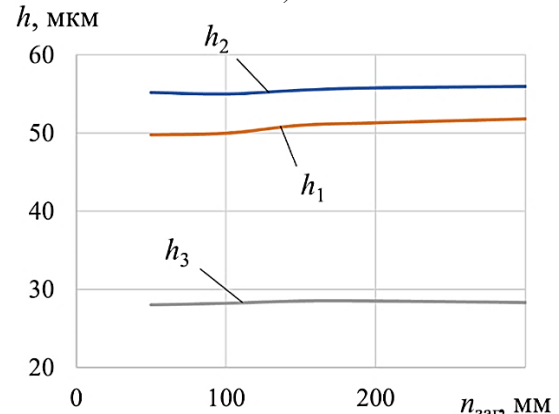
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Зависимость высот упругопластических волн от параметров и режимов упрочнения: а – от радиального натяга (t); б – от продольной подачи (S); в – от частоты вращения рабочего инструмента ($n_{\text{ин}}$); г – от частоты вращения заготовки ($n_{\text{заг}}$): h_1 , h_2 , h_3 – высота волны (см. рис. 2)

Влияние основных параметров геликоидного ППД на подъём поверхностного слоя. Из рис. 4, а видно, что при величине радиального натяга $t = 0,5$ мм, подъём Δh достигает максимального значения 3 мкм, а при дальнейшем повышении радиального натяга он падает.

Рис. 4, б показывает, что с увеличением продольной подачи (S) от 0,1 до 0,6 мм/об величина подъёма поверхностного слоя монотонно снижается с 3 до 1,5 мкм, что указывает на снижение интенсивности локальных деформаций. Эти результаты свидетельствуют о том, что с увеличением продольной подачи материал испытывает более интенсивное воздействие на первых этапах обработки, однако при воздействии второго витка инструмента деформация материала становится менее выраженной.

На рис. 4, в показана зависимость подъёма поверхностного слоя (Δh) от частоты вращения рабочего инструмента ($n_{ин}$). По мере её увеличения подъём поверхностного слоя сначала увеличивается при $n_{ин}$ от 100 до 200 об/мин, а при $n_{ин} > 200$ об/мин, подъём металла (Δh) остаётся практически постоянным.

На рис. 4, г представлена зависимость подъёма поверхностного слоя (Δh) от частоты вращения заготовки ($n_{заг}$). При увеличении частоты вращения от 50 до 250 об/мин, подъём поверхностного слоя постепенно увеличивается примерно с 3 до 3,3 мкм, что указывает на небольшое увеличение деформации поверхности материала при более высоких оборотах заготовки. Таким образом, установлено, что нормальная частота вращения заготовки оказывает слабое влияние на величину подъёма поверхностного слоя.

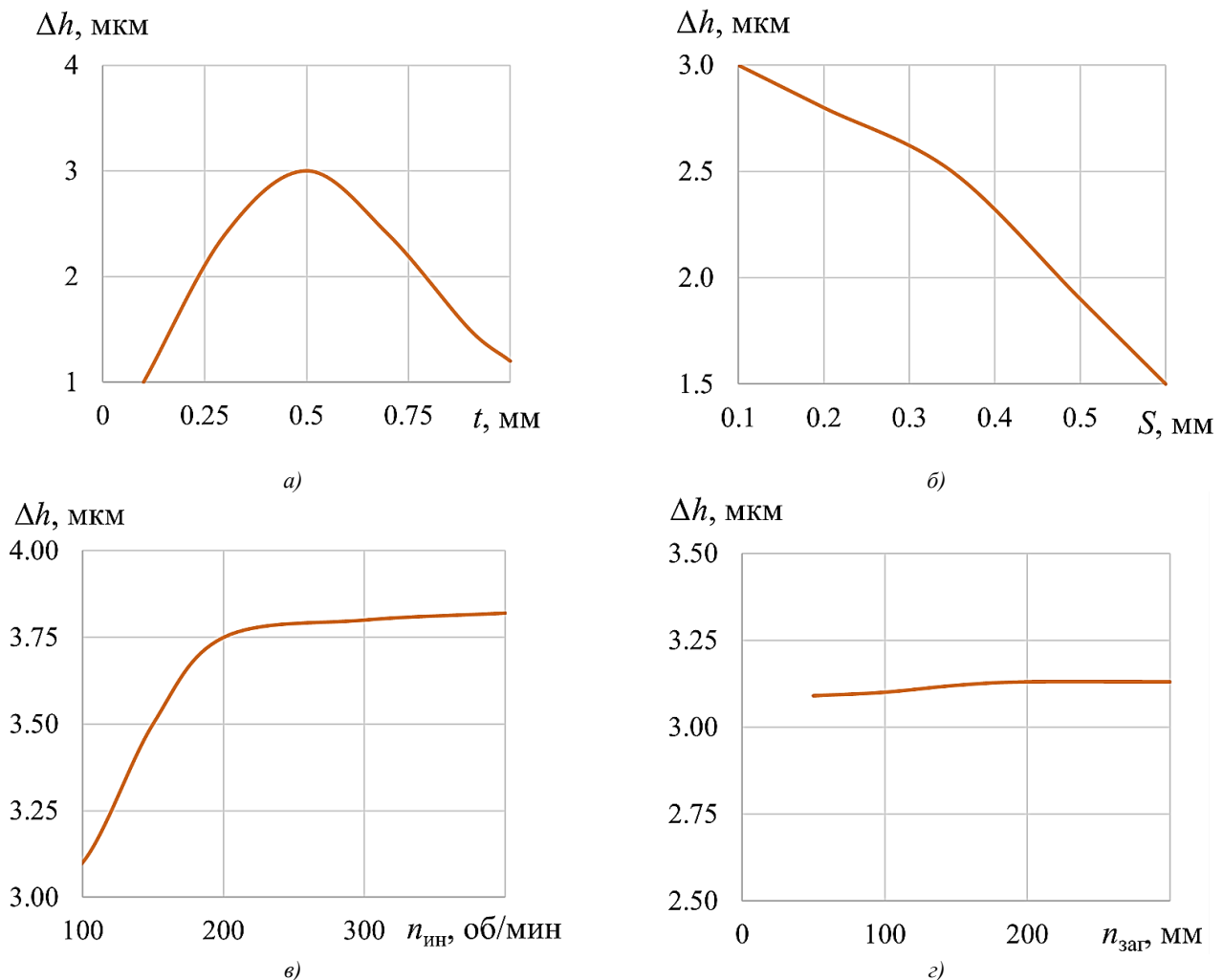


Рис. 4. Зависимость величины подъёма (Δh) упругопластического слоя от параметров и режимов упрочнения: а – от радиального натяга (t); б – от продольной подачи (S); в – от частоты вращения рабочего инструмента ($n_{ин}$); г – от частоты вращения заготовки ($n_{заг}$)

Оценка напряжённого состояния в волне. На рис. 5 представлены радиальные временные напряжения и интенсивность временных напряжений в вершинах упругопластических волн.

Из рис. 5, а следует, что максимальное радиальное напряжение в вершине между двумя витками (A_2) составляет 146,32 МПа, что является наибольшей величиной среди радиальных напряжений в вершинах волн.

На рис. 5, б изображены интенсивности временных напряжений в вершинах упругопластических волн, следует, что в вершине волны между витками (A_2) возникает наибольшая интенсивность временных напряжений 376,78 МПа. Это значение значительно ниже по сравнению с пределом прочности материала ($\sigma_b = 600$ МПа).

Это указывает на то, что хотя эта зона подвергается воздействию значительных напряжений, интенсивность временных напряжений не достигает критических величин, которые могут вызвать разрушение поверхностного слоя по нормальным напряжениям.

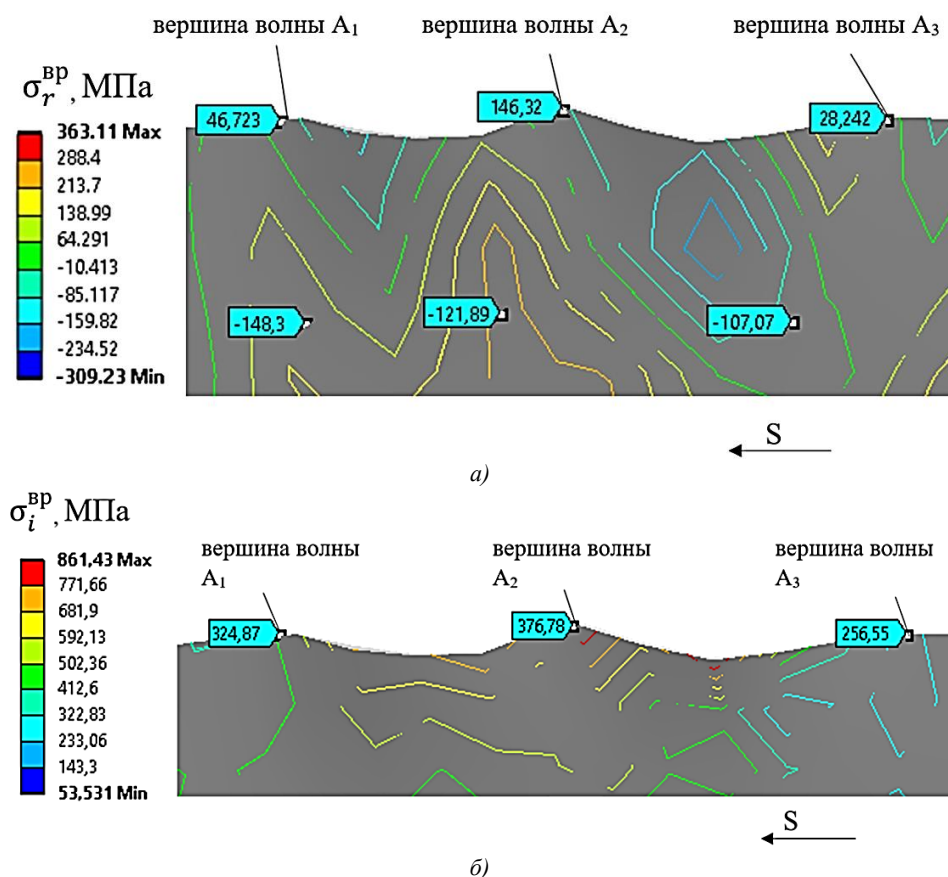


Рис. 5. Распределение радиальных временных напряжений (а) и интенсивности временных напряжений (б) в вершинах упругопластических волн при радиальном натяге $t = 0,5$ мм

На рис. 6 представлены интенсивности касательных напряжений в вершинах упругопластических волн.

Анализируя рис. 6, отметим, что интенсивности касательных напряжений в вершинах упругопластических волн сравнительно невелики и существенно ниже кри-

тических значений интенсивности касательных напряжений ($\tau_{кр} = 346$ МПа). Максимальная интенсивность касательных напряжений реализуется в вершине A_2 и составляет 161,36 МПа, в вершинах A_1 и A_3 уровень напряжений последовательно уменьшается и составляет в 145,74 МПа и 117,16 МПа, соответственно.



Рис. 6. Распределение интенсивности касательных напряжений (τ_i) в вершинах упругопластических волн ($t = 0,5$ мм)

В области упругопластических волн чаще всего возникают микротрещины, если интенсивность касательных напряжений в волне слишком высока, происходит перенаклёп, энергия расходуется не на деформацию, а на разрушение поверхности детали. Для предотвращения зарождения первых микротрещин интенсивность касательных напряжений не должна превышать критическую величину. При превышении $\tau_{кр}$ начинается неустойчивая локализация пластического сдвига, что является предпосылкой образования микротрещин. Отметим, что интенсивности касательных напряжений срав-

нительно меньше критической величины, что свидетельствует об отсутствии риска возникновения микротрещин в упругопластических волнах.

Влияние физико-механических характеристик материала на размеры упругопластических волн

Для более глубокого понимания влияния физических и механических свойств материалов на параметры внеконтактной упругопластической деформации, рассмотрим результаты моделирования, представленные на рис. 7.

В табл. даны значения модулей упругости и пределов текучести некоторых сталей и сплавов.

Таблица. Физико-механические характеристики сталей и сплавов

Физико-механические характеристики	Марка металлов					
	МА-12	АМГ2	ВТ5	Ст 15	Ст 45	12Х18Н10Т
E , ГПа	45	71	105	210	200	195
σ_T , МПа	193	100	705	225	360	196

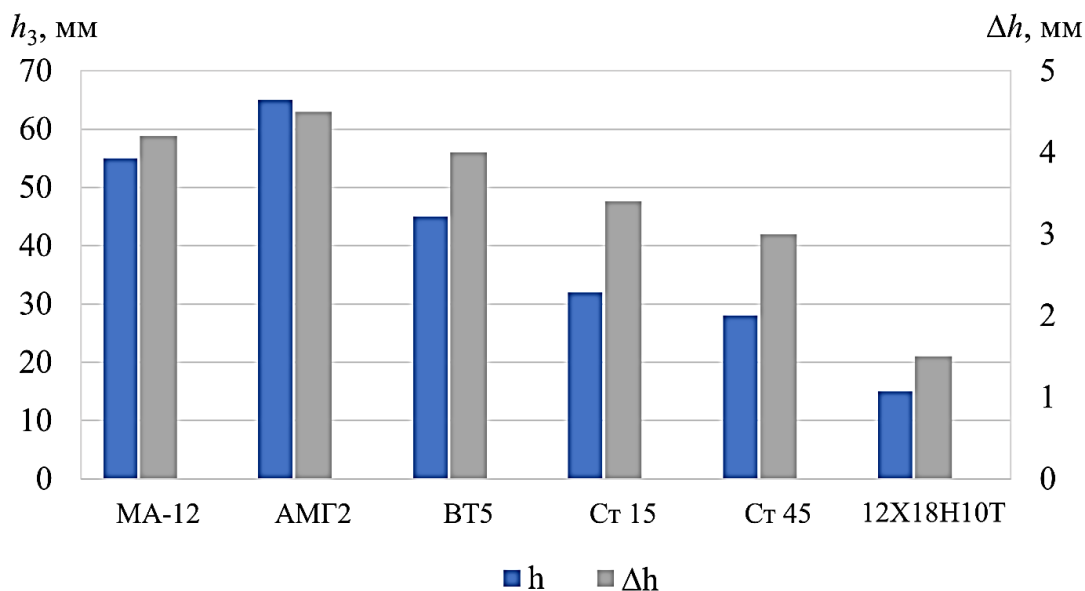


Рис. 7. Сравнительная характеристика высоты упругопластической волны A_3 (h_3) и величины подъёма поверхностного слоя (Δh) при геликоидном упрочнении некоторых материалов

Следует отметить, что на рис. 7 рассматривается только высота упругопластической волны за вторым витком (A_3) и подъём поверхностного слоя (Δh), поскольку волна A_3 является замыкающей и определяет величину подъёма поверхностного слоя. По рис. 7 установлено, что при геликоидной обработке высота упругопластической волны h_3 (A_3) и величина подъёма поверхностного слоя Δh существенно зависят от физико-механических свойств материала, прежде всего от модуля упругости E и в меньшей степени от предела текучести σ_T : материалы с низким модулем упругости (МА12, АМГ2) характеризуются наибольшими значениями h_3 и Δh , что обусловлено их высокой упругой податливостью и способностью формировать выраженную волнообразную деформацию поверхностного слоя, тогда как у нержавеющей стали 12Х18Н10Т наблюдаются минимальные значения h_3 и Δh . Влияние предела текучести проявляется в степени пластического течения, однако не является определяющим фактором, что подтверждается примером сплава ВТ5, который при высоком σ_T сохраняет

сравнительно большие значения h_3 и Δh за счёт меньшей жёсткости по сравнению со сталями. В целом же рост модуля упругости приводит к снижению высоты упругопластической волны и подъёма поверхности, а повышение σ_T ограничивает величину пластической составляющей деформации.

Заключение. Установлено, что при геликоидном поверхностно-пластическом деформировании формируется упругопластическая волна, которая определяет механизм перераспределения напряжений, величину остаточного подъёма поверхностного слоя. Подъём металла является закономерным следствием процесса деформирования и должен учитываться при изготовлении деталей. По результатам проведённого исследования получены следующие основные выводы:

1. Численное моделирование показало, что радиальный натяг является основным параметром, влияющим на линейные размеры упругопластических волн и величину подъёма поверхностного слоя: при увеличении

натяга до $t = 0,5$ мм достигаются максимальные значения высоты волн и подъёма, а дальнейшее увеличение натяга приводит к их снижению вследствие изменения характера деформации материала.

2. Установлено, что увеличение продольной подачи приводит к росту высоты упругопластических волн (A_1 и A_2), однако одновременно вызывает уменьшение высоты волны за вторым витком (A_3) и снижение величины подъёма поверхностного слоя. Частоты вращения инструмента и заготовки в исследованных диапазонах не оказывают существенного влияния, что свидетельствует о высокой стабильности процесса геликоидного ППД.

Литература

- Jia X., Hao K., Luo Z., Fan Z. Plastic deformation behavior of metal materials: a review of constitutive models // *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 2077. DOI 10.3390/met12122077.
- Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Технологические остаточные напряжения после обработки металлов давлением // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. 2016. Т. 16, № 1. С. 41–45. DOI 10.14529/met160105.
- Ebrahimzadeh P., Peral L. B., González-Martínez R., Mardaras E., Fernández-Pariente I. Influence of severe surface plastic deformation induced by shot peening on microstructure and corrosion resistance of fine grained 316L stainless steel // *Corrosion Science*. 2024. Vol. 231. P. 111988.
- La Monaca A., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte D.A., Hardy M.C., Clare A.T. Surface integrity in metal machining. Part II: Functional performance // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 164. P. 103718. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2021.103718.
- Bukaty A., Akhtamianov R., Sanginés Lezama F.A., Mukhin A., Akhtamianova L. Research of residual stresses and deformations for parts after shot peening using finite element analysis // *Eng*. 2025. Vol. 6, № 6. P. 104. DOI 10.3390/eng6060104.
- Вирт А.Э. Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2021. № 1(115). С. 44–48. DOI 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-44-48.
- Мехеда В.А. Моделирование упругопластического деформирования приповерхностных слоёв материалов // *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*. 2024. Т. 30, № 3. С. 25–34. DOI 10.18287/2541752520243032534.
- Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса поверхностного упругопластического 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.
- Demin V.A. Quality management of workpieces obtained by pressure treatment of metals // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2018. № 3(81). P. 3–9.
- Maximov J., Duncheva G. Improvements in the surface integrity and operating behaviour of metal components through slide burnishing with non-diamond-based deforming elements: review and perspectives // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 12182. DOI 10.3390/app152212182.
- Рахмиев Х.М., Гилета В.П., Самуль А.Г. Обеспечение микрогеометрического состояния поверхности деталей, выполненных из пластичных материалов, ультразвуковой обработкой // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020. Т. 16, № 6(186). С. 256–259.
- Somatkar A. A., Dwivedi R., Chinchani S. S. Enhancing surface integrity and quality through roller burnishing // *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. 2024. Vol. 31, № 1s. P. 151–169. DOI 10.52783/cana.v31.563.
- Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Daskalova P. Effect of roller burnishing and slide roller burnishing on surface integrity of AISI 316 steel: theoretical and experimental comparative analysis // *Machines*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 51. DOI 10.3390/machines12010051.
- Zhuang D.-D., Du B., Zhang S.-H., Tao W.-W., Wang Q., Shen H.-B. Effect and action mechanism of ultrasonic assistance on microstructure and mechanical performance of laser cladding 316L stainless steel coating // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 433. P. 128122.
- Dzionk S., Sciborski B. The characteristics of the surface structure obtained in a low plasticity burnishing process in which the jumping wave occurred // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 17644. DOI 10.1038/s41598-025-02449-2.
- Зайдес С.А., Куан Х.М. Внеконтактная деформация при маятниковом поверхностном пластическом деформировании конструкционной стали // *Чёрные металлы*. 2022. № 9. С. 55–60. DOI 10.17580/chm.2022.09.09.
- Зайдес С.А., Ву К.Х. Влияние ориентации геликоидного инструмента на напряжённо-деформированное состояние упрочнённых деталей из углеродистой стали // *Чёрные металлы*. 2026. № 1. С. 39–45. DOI 10.17580/chm.2026.01.04.
- Oliveira D. A. A. de, Brito P.P., Magalhães F. de C., Azzi P.C., Ardisson J.D., Abrão A.M. Influence of low plasticity burnishing on the formation of strain induced martensite in the surface layer // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 27. P. 4573–4594. DOI 10.1016/j.jmrt.2023.10.133.
- Elsamanty M., Youssef W., Abdulsalam M. et al. Numerical investigation of ball burnishing process using a comprehensive three-dimensional finite element model // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2025. DOI 10.1007/s12541-025-01372-w.
- Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Внеконтактная деформация при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2023. № 3. С. 63–74. – DOI 10.15593/pern.mech/2023.3.06.

References

- Jia X., Hao K., Luo Z., Fan Z. Plastic deformation behavior of metal materials: a review of constitutive models // *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 2077. DOI 10.3390/met12122077.
- Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. Technological residual stresses after metal forming by pressure treatment. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*. 2016. vol. 16. No. 1, pp. 41–45. DOI: 10.14529/met160105.

3. Ebrahimzadeh P., Peral L. B., González-Martínez R., Mardaras E., Fernández-Pariente I. Influence of severe surface plastic deformation induced by shot peening on microstructure and corrosion resistance of fine grained 316L stainless steel // *Corrosion Science*. – 2024. Vol. 231. P. 111988.
4. La Monaca A., Murray J. W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte D.A., Hardy M.C., Clare A.T. Surface integrity in metal machining. Part II: Functional performance // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 164. P. 103718. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2021.103718.
5. Bukaty A., Akhtamianov R., Sanginés Lezama F. A., Mukhin A., Akhtamianova L. Research of residual stresses and deformations for parts after shot peening using finite element analysis // *Eng*. 2025. Vol. 6, № 6. P. 104. DOI 10.3390/eng6060104.
6. Wirth A.E. Influence of deformation force in surface plastic deformation on the depth of surface layer hardening. *Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2021, No. 1(115), pp. 44–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-44-48.
7. Mekheda V. A. Modeling of elastoplastic deformation of near-surface material layers. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 2024. vol. 30. No. 3. P. 25–34. DOI: 10.18287/2541752520243032534.
8. Makhlov M.S., Blyumenshtein V. Yu. Mechanics of the surface plastic deformation process. Model of a strain-hardening elastoplastic body. *Metal Working and Material Science (Technology, Equipment, Tools)*. 2018. vol. 20. No. 4, P. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-6-20.
9. Demin V.A. Quality management of workpieces obtained by pressure treatment of metals // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2018. № 3(81). P. 3–9.
10. Maximov J., Duncheva G. Improvements in the surface integrity and operating behaviour of metal components through slide burnishing with non-diamond-based deforming elements: review and perspectives // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 12182. DOI 10.3390/app152212182.
11. Rakhimyanov Kh. M., Gileta V.P., Samul A.G. Ensuring the microgeometric surface state of parts made of ductile materials by ultrasonic treatment. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2020. vol. 16. No. 6(186). P. 256–259.
12. Somatkar A.A., Dwivedi R., Chinchani S.S. Enhancing surface integrity and quality through roller burnishing // *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. 2024. Vol. 31, № 1s. P. 151–169. DOI 10.52783/cana.v31.563.
13. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Anastasov K., Daskalova P. Effect of roller burnishing and slide roller burnishing on surface integrity of AISI 316 steel: theoretical and experimental comparative analysis // *Machines*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 51. DOI 10.3390/machines12010051.
14. Zhuang D.-D., Du B., Zhang S.-H., Tao W.-W., Wang Q., Shen H.-B. Effect and action mechanism of ultrasonic assistance on microstructure and mechanical performance of laser cladding 316L stainless steel coating // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 433. P. 128122.
15. Dzionk S., Scibiorski B. The characteristics of the surface structure obtained in a low plasticity burnishing process in which the jumping wave occurred // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 17644. DOI 10.1038/s41598-025-02449-2.
16. Zaides S.A., Quan H.M. Non-contact deformation in pendulum surface plastic deformation of structural steel. *Ferrous Metals*. 2022. No. 9. P. 55–60. DOI: 10.17580/chm.2022.09.09.
17. Zaides S.A., Vu K.H. Influence of helical tool orientation on the stress-strain state of hardened carbon steel parts. *Ferrous Metals*. 2026. No. 1. P. 39–45. DOI: 10.17580/chm.2026.01.04.
18. Oliveira D.A. A. de, Brito P.P., Magalhães F. de C., Azzi P.C., Ardisson J.D., Abrão A. M. Influence of low plasticity burnishing on the formation of strain induced martensite in the surface layer // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 27. P. 4573–4594. DOI 10.1016/j.jmrt.2023.10.133.
19. Elsamanty M., Youssef W., Abdulsalam M. et al. Numerical investigation of ball burnishing process using a comprehensive three-dimensional finite element model // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2025. DOI 10.1007/s12541-025-01372-w.
20. Zaides S.A., Nguyen H.H. Non-contact deformation in reverse surface plastic deformation. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2023. No. 3. P. 63–74. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.3.06.