



Влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жёсткости схемы напряжённого состояния

Хыу Хай Нгуен^{1✉}, Семен Азикович Зайдес²

¹Офицерское училище Военно-Воздушных Сил, Нячанг, Вьетнам

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Целью данной работы является установление влияния параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния и определение рациональных параметров упрочняющего процесса. В исследованиях использовано программное обеспечение SOLIDWORKS 2019 (для 3D-проектирования) и метод конечных элементов на основе компьютерной программы ANSYS Workbench 19.1 (для построения математической модели). Для решения задачи по получению наилучшего значения показателя жесткости схемы напряженного состояния упрочненных деталей реверсивным выглаживанием использована компьютерная программа Microsoft Visual Studio 2012 путем программирования на языке Python с выявлением рациональных параметров реверсивного выглаживания. Определено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на формирование максимальной интенсивности временных напряжений и показателя жесткости схемы временных напряжений упрочненных деталей. По результатам статистической обработки полученных данных установлены рациональные режимы упрочнения, обеспечивающие формирование максимально возможного показателя жесткости схемы напряженного состояния в очаге деформации: величина продольной подачи в диапазоне 0,07–0,08 мм/об; частота вращения заготовки в диапазоне 280–300 об/мин; величина радиального натяга в диапазоне 0,25–0,28 мм; начальный угол установки рабочего инструмента 90°; амплитуда угла реверсивного вращения рабочего инструмента в диапазоне ±55–60° и реверсивная частота вращения рабочего инструмента в диапазоне 270–300 дв.ход/мин. Полученные рациональные режимы упрочнения реверсивным выглаживанием позволяют достичь максимально возможной высокой жесткости схемы напряжений, что приводит к улучшению механических характеристик обрабатываемых деталей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение математических моделей, описывающих процесс реверсивного выглаживания, а также на проведение экспериментальных работ для выявления оптимальных режимов обработки различных материалов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование, реверсивное выглаживание, показатель жесткости схемы напряженного состояния, статистическая обработка

Для цитирования: Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А. Влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жёсткости схемы напряжённого состояния // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 170–183. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-170-183>. EDN: GLGGYX.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Influence of reversible smoothing parameters on the stiffness indicator of the stress state scheme

Huu Hai Nguyen^{1✉}, Semen A. Zaides²

¹Air Force Officer College, Nha Trang, Viet Nam

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim of this work is to determine the influence of reversible smoothing parameters on the stiffness index of the stress state scheme and to identify rational parameters for the strengthening process. The research was carried out using the software SOLIDWORKS 2019 (for 3D design) and the finite element method based on the computer program ANSYS Workbench 19.1 (for construction of the mathematical model). In order to obtain the optimal value of the stiffness index for the stress state scheme of parts reinforced by reversible smoothing, the Microsoft Visual Studio 2012 computer program was used, with programming in Python to identify rational parameters for reversible smoothing. The influence of the main technological parameters of reversible smoothing on the formation

of the maximum residual stress intensity and the stiffness index of the residual stress scheme in strengthened parts was determined. On the basis of the statistical analysis of the obtained data, rational strengthening modes have been established, which ensure the formation of the maximum possible stiffness index of the stress state scheme in the deformation zone: the longitudinal feed rate in the range of 0.07–0.08 mm/rev; the rotation frequency of the blank in the range of 280–300 rpm; the radial stress value in the range of 0.25–0.28 mm; the initial setting angle of the working tool at 90°; the amplitude of the reversible rotation angle of the working tool in the range of $\pm 55^\circ$ – $\pm 60^\circ$; and the reversible rotation frequency of the working tool in the range of 270–300 double pass per min. The rational reinforcement modes obtained by reversible smoothing make it possible to achieve the maximum possible high rigidity of the stress scheme, resulting in improved mechanical properties of the machined parts. Future research could be directed towards refining the mathematical models describing the reversible smoothing process and carrying out experimental work to identify the optimum machining modes for different materials.

Keywords: stress-strain state, finite element modeling, reverse burnishing, rigidity index of the stress-strain state diagram, statistical processing

For citation: Nguyen Huu Hai, Zaides S.A. Influence of reversible smoothing parameters on the stiffness indicator of the stress state scheme. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):170-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-170-183>. EDN: GLGGYX.

ВВЕДЕНИЕ

Цилиндрические детали широко применяются в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, авиацию, автомобильную и нефтегазовую индустрию. Они используются в качестве валов, осей, втулок, цилиндров и других элементов, обеспечивающих передачу различных движений, нагрузок в машинах и механизмах. Надежность таких деталей во многом зависит от состояния их рабочих поверхностей, подвергающихся значительным нагрузкам в процессе эксплуатации. Отказы цилиндрических деталей чаще всего связаны с износом, усталостным разрушением, коррозией и повреждениями вследствие перегрузок [1, 2]. В современном машиностроении и металлообработке важное значение имеет повышение механических свойств деталей, в частности их статической и усталостной прочности [3–5]. Одним из эффективных методов упрочнения и улучшения характеристик поверхностного слоя является поверхностное пластическое деформирование (ППД) [6–8].

Механические свойства поверхностного слоя оказывают разное влияние на потребительские свойства изделий. Так, детали, работающие в машинах и механизмах, должны обладать определенной твердостью, прочностью, контактной выносливостью. Наличие пластической деформации при эксплуатации крайне недопустимо, так как она приводит к необратимому изменению формы деталей, которое может привести к повреждению или разрушению конструкций.

В то же время, когда из этого же металла обрабатывают заготовку, то на первый план выходит пластичность металла, которая позволяет получить необходимую форму изделия при обработке давлением или снизить энергетические затраты и износ инструмента при обработке металлов резанием.

Металлы с высокой пластичностью лучше поддаются поверхностному пластическому деформированию, так как способны претерпевать значительные пластические деформации без разрушения. Металлы с достаточной пластичностью способны деформироваться под нагрузкой, что позволяет сглаживать микронеровности и дефекты на поверхности. Это снижает концентрацию напряжений и уменьшает вероятность образования трещин и других очагов разрушения. Пластичность способствует тому, что при воздействии внешних нагрузок, например, ударов или трения, металл не разрушается сразу, а сначала деформируется. Это позволяет деталям машин выдерживать значительные механические нагрузки без катастрофических последствий. При пластической деформации металлы могут способствовать образованию тонких окисных или защитных слоев, препятствующих коррозии и износу [9, 10].

Для оценки пластического состояния нагруженного тела наибольшее распространение получил показатель жесткости схемы напряженного состояния, по которому можно оценить влияние напряжений и структурные изменения в материале [11, 12].

Мягкие схемы, т.е. низкое значение показателя жесткости схемы (объемное сжатие, всестороннее сжатие, гидростатическое давление) – повышают пластичность металлов, так как препятствуют образованию и развитию микротрещин.

Жесткие схемы (высокий показатель жесткости, одноосное растяжение, сложное напряженное состояние с высокими касательными напряжениями) – уменьшают пластичность, ускоряя локализацию деформации и зарождение трещин [11].

Поверхностное пластическое деформирование может повышать пластичность за счет измельчения зерен в поверхностном слое (эффект динамической рекристаллизации) [13].

Однако традиционные методы ППД имеют ряд недостатков, которые могут снижать эффективность обработки и приводить к дефектам на поверхности изделий. Для повышения эффективности ППД необходимо применять современные технологии моделирования, адаптивные системы управления, износостойкие инструменты и комбинированные методы обработки. В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработан новый способ ППД на основе реверсивного выглаживания поверхностного слоя тороидальным роликом [14]. В проведенных исследованиях [15, 16] установлено, что разработанный способ упрочнения приводит к формированию тонкого поверхностного слоя с весьма малыми размерами зеренной структуры материала, а также увеличению временных напряжений сжатия, особенно в приповерхностной зоне. Эти изменения положительно сказываются на снижении риска усталостного разрушения и продлении срока службы машинных деталей.

Цель исследования заключается в анализе влияния параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния и определении полученных данных по результатам статистической обработки рациональных параметров упрочняющего процесса, обеспечивающих формирование максимально возможного показателя жесткости напряженного состояния в очаге деформации.

СПОСОБ РЕВЕРСИВНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

На рис. 1 представлена схема реверсивного выглаживания цилиндрических деталей, включающая геометрию рабочего ролика и конечно-элементное моделирование процесса деформации.

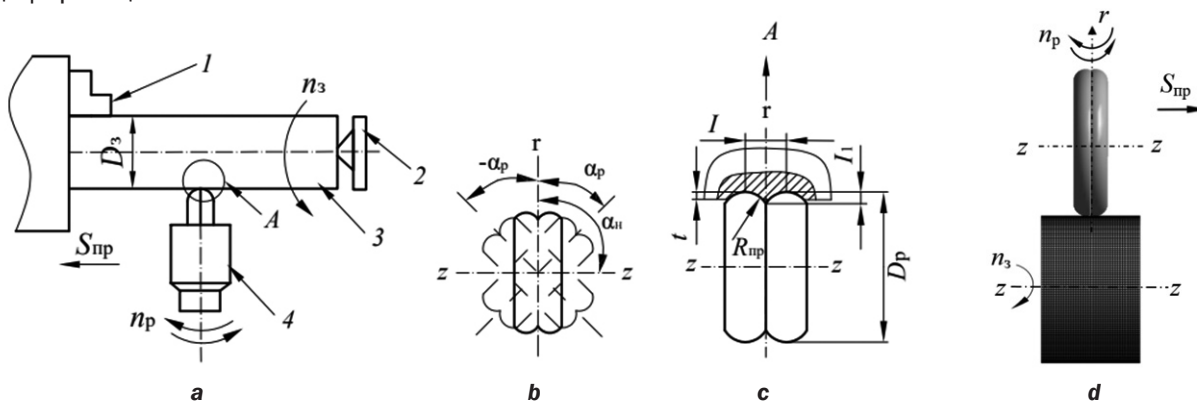


Рис. 1. Принципиальная схема реверсивного выглаживания роликом с двумя радиусами (а), схема реверсивного вращательного движения рабочего инструмента (б), конфигурация рабочего ролика (с) и конечно-элементная модель процесса деформации (д) [15]: 1 – трехкулачковый патрон; 2 – задняя бабка; 3 – заготовка; 4 – рабочий инструмент

Fig. 1. Schematic diagram of reverse burnishing with a two radii roller (a), diagram of reversible rotary motion of the working tool (b), working roller configuration (c), finite element model of the deformation process (d) [15]: 1 – three-jaw chuck; 2 – tailstock; 3 – workpiece; 4 – working tool

Способ реверсивного выглаживания – это способ механической обработки поверхности, при котором выглаживающий инструмент с реверсивным круговым движением перемещается вдоль заготовки с некоторой величиной продольной подачи. Этот процесс основан на пластической деформации поверхностного слоя детали с целью уменьшения микронеровностей и повышения микротвердости. В качестве рабочего инструмента (РИ) использован двухрадиусный ролик с высокой твердостью.

Согласно представленной технологической схеме (см. рис. 1 а), кинематика процесса определяется следующими параметрами: скоростью вращения заготовки (n_3), продольной

подачей рабочего инструмента (S_{np}), амплитудой углового реверсивного вращения рабочего инструмента (α_p), начальными углом его установки (α_n) и частотой реверсивного вращения (n_p).

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет напряженного состояния является важнейшей задачей при проектировании конструкций, позволяя оценивать их надежность и безопасность. Метод конечных элементов (МКЭ) выделяется своей универсальностью среди различных подходов к расчетам. Его суть состоит в разделении сложной конструкции на небольшие части, называемые конечными элементами, для которых находятся решения упрощенных уравнений равновесия. Одним из наиболее эффективных инструментов, применяемых для реализации МКЭ, считается программа Ansys [17–19]. Методика для проведения компьютерного моделирования процесса реверсивного выглаживания представлена в работе [15].

Для анализа напряженного состояния в различных участках цилиндрического образца, с учетом основных компонент тензора напряжений, была рассчитана интенсивность временных напряжений [15]:

$$\sigma_i^{BP} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{BP} - \sigma_\varphi^{BP})^2 + (\sigma_\varphi^{BP} - \sigma_r^{BP})^2 + (\sigma_r^{BP} - \sigma_z^{BP})^2]}, \quad (1)$$

где σ_z^{BP} , σ_r^{BP} , σ_φ^{BP} – главные компоненты временных напряжений в цилиндрической системе координат.

В большинстве исследований рассматривается тип напряженного состояния, который характеризуется показателем жесткости схемы напряженного состояния по В.Л. Колмогорову в виде [19]:

$$\Pi_{BP} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\sigma_z^{BP} + \sigma_r^{BP} + \sigma_\varphi^{BP}}{(\sigma_z^{BP} - \sigma_\varphi^{BP})^2 + (\sigma_\varphi^{BP} - \sigma_r^{BP})^2 + (\sigma_r^{BP} - \sigma_z^{BP})^2}}. \quad (2)$$

Знак показателя жесткости схемы напряженного состояния играет важную роль в механике деформируемого твердого тела и теории прочности. Он характеризует тип напряженного состояния в материале, определяя его склонность к хрупкому или пластическому разрушению [20–22]. При положительных значениях коэффициента Π указывает на преобладание одноосного или объемного растяжения. В этом случае материал разрушается по механизму хрупкого разрушения, при отрицательных знаках соответствует сжатию или объемному сжатию, что способствует пластическому течению материала [22].

Исследуем, как ключевые параметры процесса реверсивного выглаживания воздействуют на максимальную интенсивность временных напряжений (σ_i^{BP}), а также на составляющие тензора временных напряжений (σ_z^{BP} , σ_r^{BP} , σ_φ^{BP}) и показатель жесткости схемы напряженного состояния (Π) в упрочненном слое.

На рис. 2 показано воздействие ключевых параметров технологии реверсивного выглаживания на основные составляющие тензора предельных временных напряжений.

Анализ данных, представленных на рис. 2, демонстрирует, что увеличение технологических параметров реверсивного выглаживания вызывает неравномерный рост и снижение основных компонент тензора максимальных напряжений во времени. Например, увеличение радиального натяга первоначально способствует росту главных компонент напряжений (см. рис. 2 а). Однако при увеличении радиального натяга до определенного предела наблюдается снижение главных компонент напряжений. Это объясняется тем, что при достижении критического значения натяга происходит перенапряжение и перераспределение напряжений вглубь материала, при этом материал начинает демонстрировать эффект пластической релаксации [23].

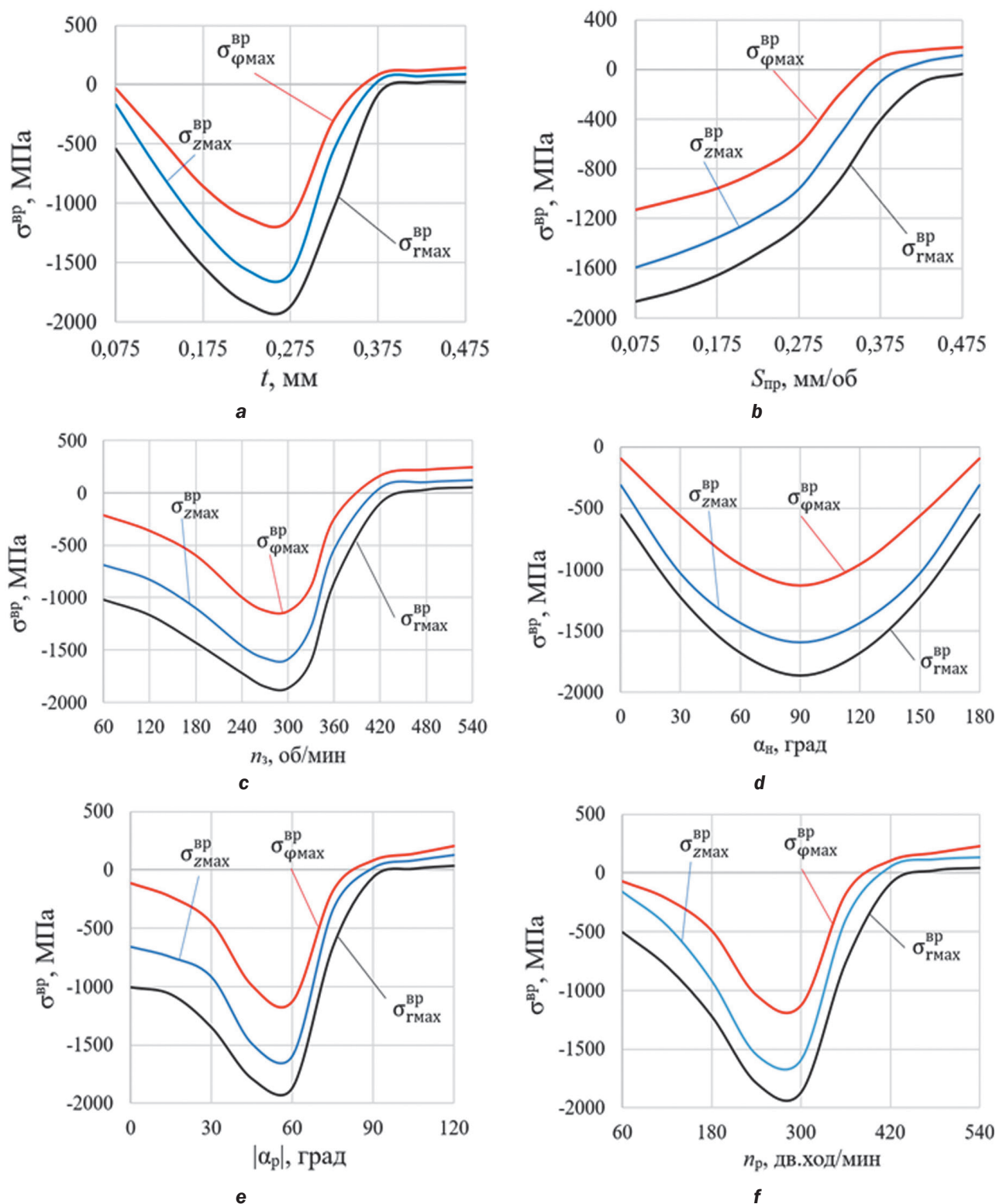


Рис. 2. Воздействие ключевых параметров процесса реверсивного выглаживания на основные составляющие тензора предельных временных напряжений: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Fig. 2. Effect of key parameters of reverse burnishing on the main components of the ultimate temporary stress tensor: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

На рис. 3 представлена зависимость максимальной интенсивности временных напряжений от ключевых технологических параметров, полученная после обработки цилиндрической детали методом реверсивного выглаживания.

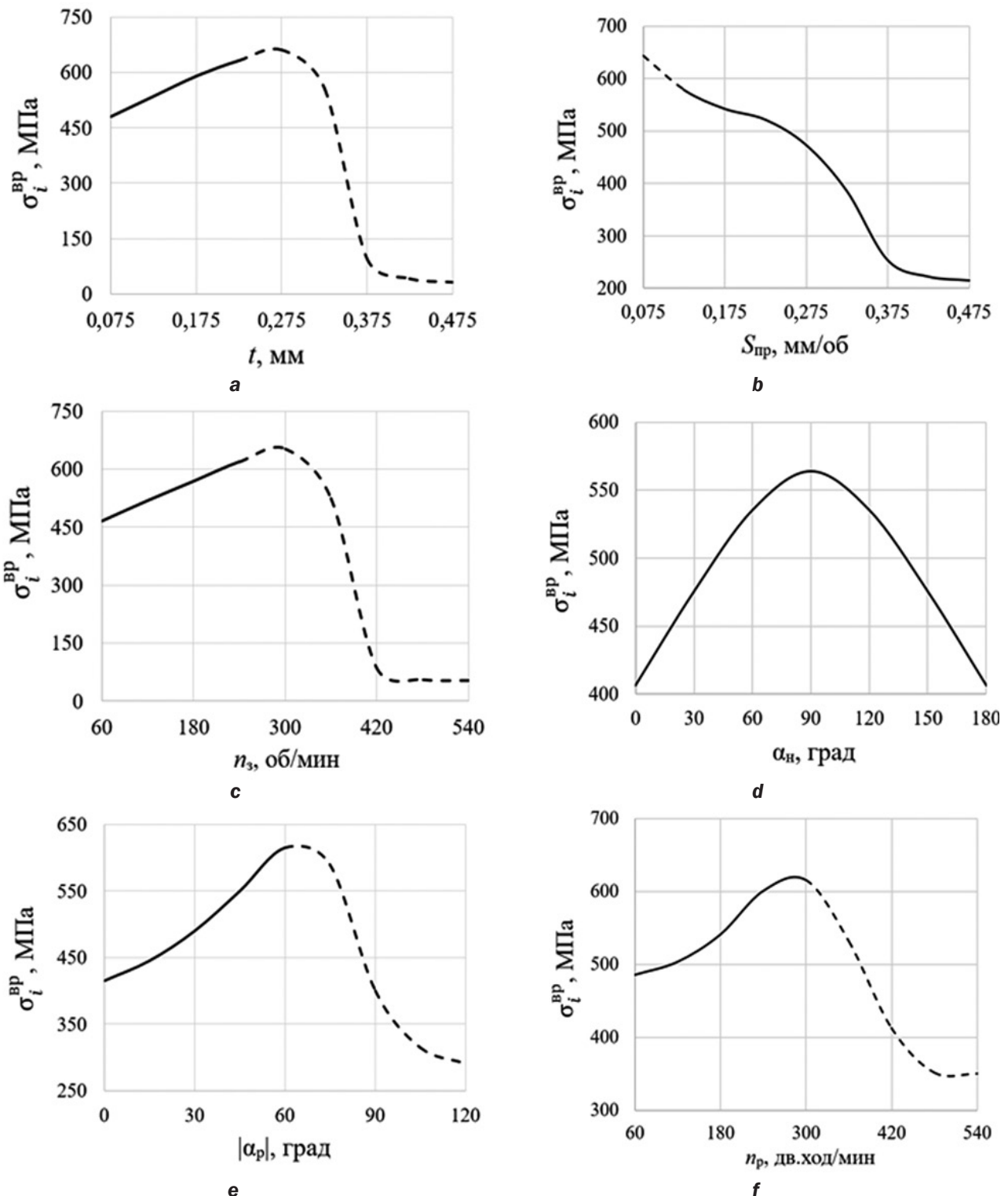


Рис. 3. Графики изменения предельных временных напряжений в зависимости от основных режимов обработки при упрочнении цилиндрических деталей способом реверсивного выглаживания: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p
Fig. 3. Graphs of changes in ultimate temporary stresses depending on the main processing modes when cylindrical part hardening by reverse burnishing: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Результаты, представленные на рис. 3, демонстрируют, что при варьировании радиально-го натяга в интервале 0,075–0,275 мм, частоты вращения заготовки от 60 до 300 об/мин и реверсивной частоты вращения РИ в диапазоне 60–300 дв.ход/мин величина максималь-

ных напряжений возрастает на 7% (с 21 до 28%). Установленная закономерность обусловлена увеличением контактного давления в зоне инструмент-заготовка при повышении радиального натяга. Это вызывает рост напряжений в материале заготовки, особенно в зоне контакта. В результате максимальные напряжения увеличиваются. С увеличением частоты вращения заготовки возрастают центробежные силы и инерционные нагрузки. Это может привести к увеличению напряжений в материале. Реверсивное вращение (периодическая смена направления вращения) создает дополнительные циклические нагрузки на материал. Это может вызвать усталостные напряжения и увеличить интенсивность максимальных напряжений, особенно в зонах концентрации напряжений. Однако при достижении критического уровня напряжений наблюдается их последующее снижение, сопровождаемое значительным ростом интенсивности временных напряжений, их величина превышает предел прочности материала заготовки ($\sigma_b = 600$ МПа), так как после предела прочности материал повреждается или разрушается (пунктирные линии). Это связано с несколькими факторами [24]:

1) перенаклеп – в процессе пластической деформации материал сначала упрочняется, но при достижении определенного уровня напряжений (предел прочности) начинается разрушение структуры, что может приводить к снижению несущей способности материала;

2) образование и развитие трещин – после достижения предела прочности материал начинает разрушаться: сначала появляются микротрещины, которые затем разрастаются, снижая эффективное сечение, воспринимающее нагрузку;

3) динамические явления и релаксация напряжений в постразрушающей стадии – в процессе разрушения материала, особенно при динамическом нагружении, наблюдаются кратковременные пики напряжений, величина которых может превосходить статический предел прочности. Данный эффект обусловлен распространением ударных волн, скачкообразным изменением внешней нагрузки, а также нестационарными процессами релаксации.

Как видно из рис. 3, снижение продольной подачи с 0,475 до 0,075 мм/об вызывает увеличение пиковой интенсивности временных напряжений на 66,5%. При этом установлено, что существуют оптимальные значения начального угла установки резца ($\alpha_n = 90^\circ$) и амплитуды угла реверса ($\alpha_p \approx \pm 60^\circ$), при которых достигается максимальный уровень динамических напряжений.

На рис. 4 отображены радиальные распределения компонент тензорного поля напряжений и параметра жесткости при временном нагружении цилиндрической заготовки

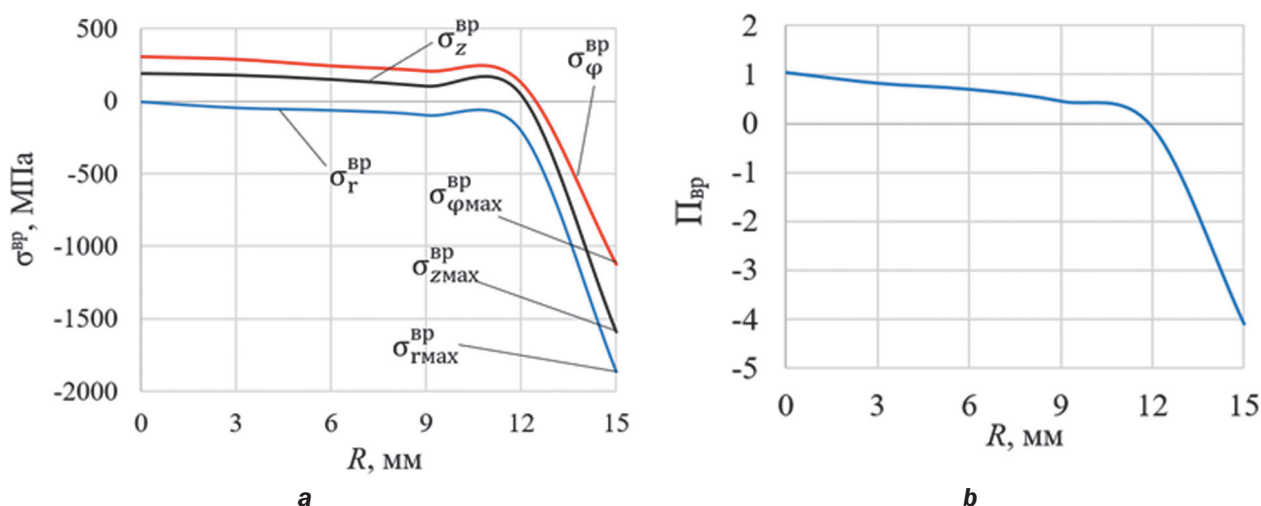


Рис. 4. Зависимости компонент тензора (а) и значения показателя жесткости схемы временных напряжений (б) от радиуса цилиндрического образца, полученные в процессе реверсивного выглаживания (при $t = 0,075$ мм, $S_{np} = 0,075$ мм/об, $n_3 = 300$ мин⁻¹, $n_p = 300$ дв.ход/мин, $\alpha_n = 90^\circ$, $\alpha_p = \pm 60^\circ$)

Fig. 4. Dependences of the tensor components (a) and the rigidity index of the temporatry stress circuit (b) on the radius of the cylindrical sample obtained during reverse burnishing (at $t = 0.075$ mm, $S_{np} = 0.075$ mm/rev, $n_3 = 300$ min⁻¹, $n_p = 300$ double stroke/min, $\alpha_n = 90^\circ$, $\alpha_p = \pm 60^\circ$)

после процесса реверсивного выглаживания (параметры обработки: $t = 0,075$ мм, $S_{np} = 0,075$ мм/об, $n_3 = 300$ мин⁻¹, $n_p = 300$ дв.ход/мин, $\alpha_n = 90^\circ$, $\alpha_p = \pm 60^\circ$). Как видно из графических данных, в приповерхностной зоне, непосредственно контактирующей с деформирующим инструментом, возникает трехосное сжатие с доминирующей радиальной компонентой. Внутренние слои демонстрируют локальные зоны растяжения в осевой и тангенциальной плоскостях с амплитудой напряжений, составляющей 35–45% от величины σ_v обрабатываемого сплава (рис. 4 а). Это объясняется тем, что при упрочнении цилиндрической заготовки роликом поверхностные слои сжимаются и уплотняются, но объемный эффект пластической деформации приводит к неравномерному перераспределению напряжений. В результате внутренняя часть заготовки, стремясь компенсировать деформацию внешних слоев, испытывает временные растягивающие напряжения. Аналогичным образом наибольшее отрицательное значение показателя Π наблюдается на поверхности заготовки, после чего оно постепенно возрастает по мере приближения к центральной области (см. рис. 4 б).

На рис. 5 представлено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы временных напряжений. Как показано на рис. 5, на начальном этапе обработки рост радиального натяга, скорости вращения заготовки, амплитуды реверса инструмента и частоты его реверсивного вращения способствует увеличению показателя жесткости схемы, напряженной на 84–96%. При дальнейшем увеличении таких параметров упрочнения значение показателя жесткости схемы напряжений уменьшается и затем выравнивается. Это связано с динамическими процессами в системе:

- увеличение радиального натяга приводит к росту контактных напряжений, что может вызвать пластическую деформацию или перераспределение напряжений, снижая жесткость системы;
- рост частоты вращения заготовки усиливает динамические нагрузки, что может привести к вибрациям и снижению эффективной жесткости системы;
- реверсивная частота вращения инструмента вызывает циклические нагрузки, способствуя усталостным явлениям и снижению жесткости.

Как видно из рис. 5, снижение продольной подачи с 0,475 до 0,075 мм/об способствует увеличению жесткости схемы напряжений на 82%. Кроме того, проведенные исследования выявили наличие оптимального начального угла установки режущего инструмента ($\alpha_n = 90^\circ$), при котором данный показатель достигает максимума.

Определение оптимальных режимов обработки способом реверсивного выглаживания представляет собой критически важный фактор для формирования устойчивого напряженно-деформированного состояния и повышения эксплуатационного ресурса деталей. В исследовании применен алгоритм численного моделирования, реализованный в среде Microsoft Visual Studio 2012, с целью максимизации критерия жесткости напряженного состояния. В качестве варьируемых параметров рассматривались следующие: S_{np} в диапазоне 0,075–0,425 мм/об; n_3 в диапазоне 60–540 об/мин; t в диапазоне 0,075–0,425 мм; α_n в диапазоне 0–180°; α_p в диапазоне 0–120° и n_p в диапазоне 60–540 дв.ход/мин. Методика для проведения оптимизации процесса реверсивного выглаживания представлена в работе [14]. При этом показатель жесткости схемы временных напряжений определяется следующими выражениями:

$$\Pi_{вр} = \begin{cases} -34,9S_{np}^2 + 33,1S_{np} - 7,0 \\ (7E - 05)n_3^2 - 0,04n_3 + 1,54 \\ 108,2t^2 - 51,1t + 2,6 \\ (6E - 05)n_p^2 - 0,03n_p + 0,39 \\ (1E - 03)\alpha_p^2 - 0,1\alpha_p - 0,6 \\ (5E - 04)\alpha_n^2 - 0,09\alpha_n - 0,02 \end{cases} \quad (3)$$

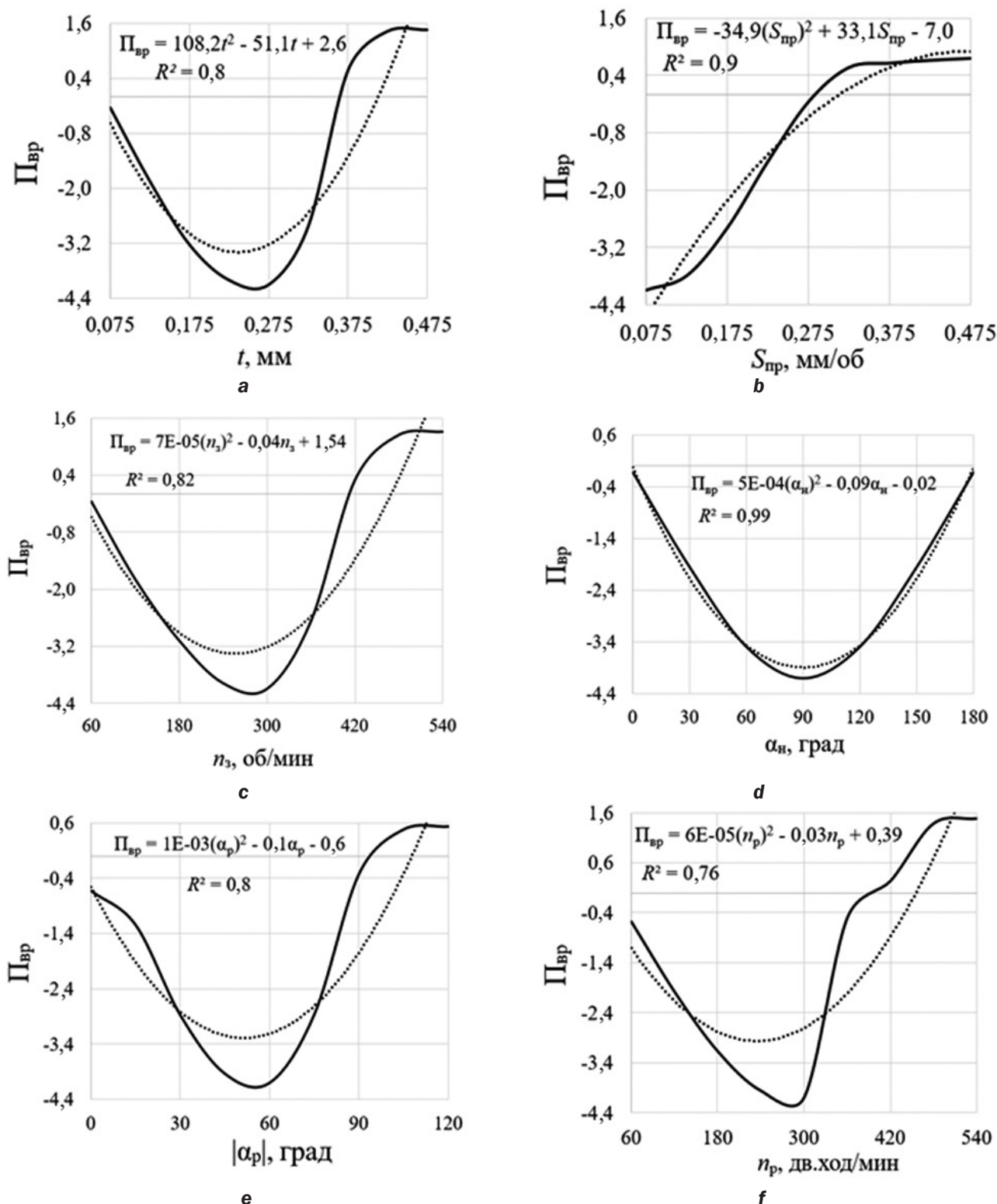


Рис. 5. Зависимость показателя жесткости схемы временных напряжений от ключевых технологических параметров процесса реверсивного выглаживания: а – t ; б – S_{np} ; в – n_z ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Fig. 5. Dependence of the rigidity index of the temporary stress circuit on the key technological parameters of reverse burnishing: а – t ; б – S_{np} ; в – n_z ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Обработка представленных уравнений осуществляется в среде Microsoft Visual Studio 2012 с использованием языка программирования Python, что позволяет определить рациональные параметры процесса реверсивного сглаживания.

Результаты численного моделирования. На рис. 6 приведены данные статистического анализа, позволяющего определить рациональные параметры процесса упрочнения, при которых достигается максимальная жесткость схемы временных напряжений деталей, обработанных методом реверсивного выглаживания.

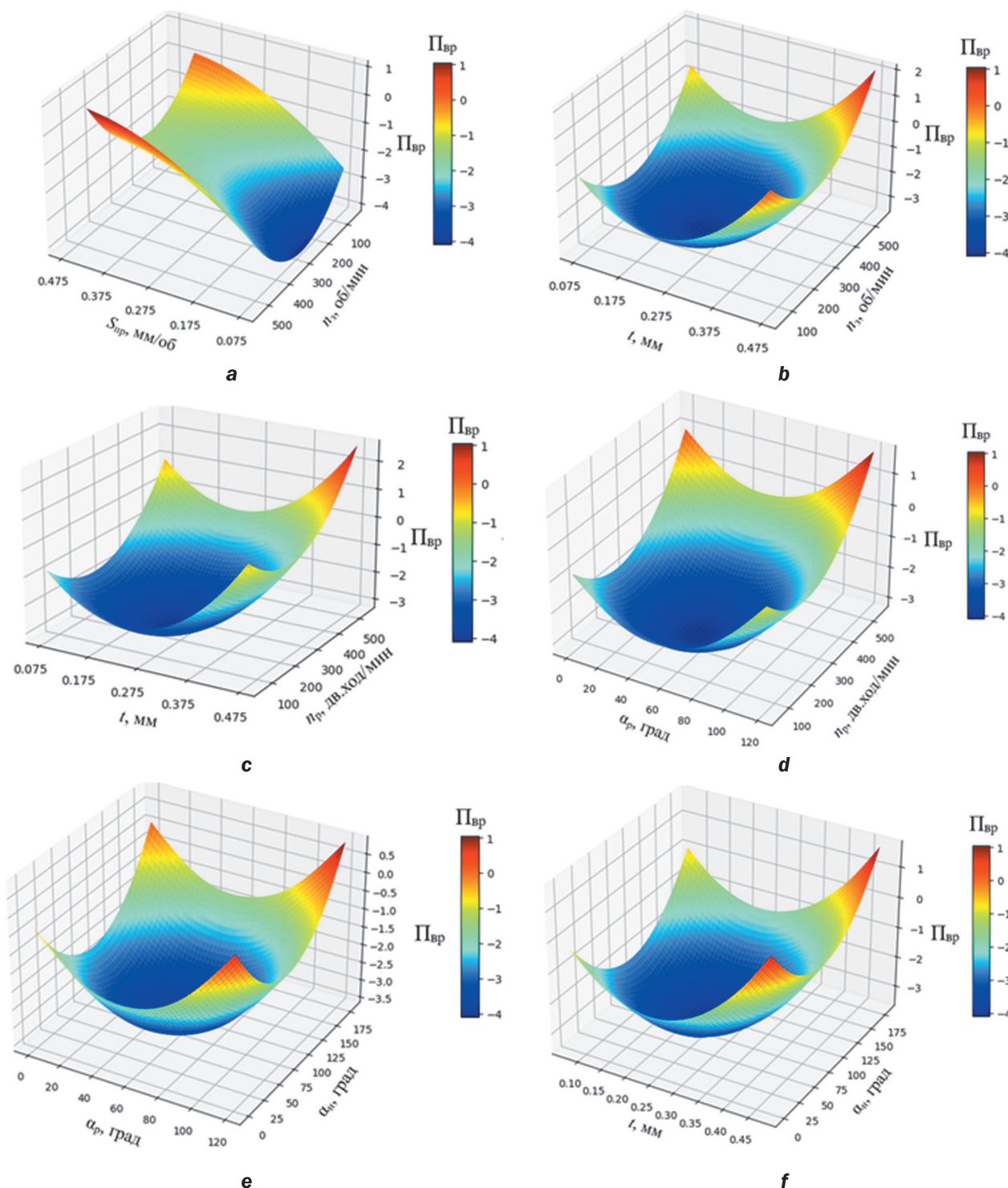


Рис. 6. Графическое представление взаимосвязи между параметрами обработки реверсивным выглаживанием и показателем жесткости схемы временных напряжений упрочняемых деталей при реверсивном выглаживании: а – $S_{пр}$ и n_3 ; б – n_3 и t ; в – t и n_p ; д – n_p и α_p ; е – α_p и α_n ; ф – t и α_n

Fig. 6. Graphical representation of the relationships between the parameters of reverse burnishing and the rigidity index of the temporary stress circuit of the hardened parts during reverse burnishing: а – $S_{пр}$ and n_3 ; б – n_3 and t ; в – t and n_p ; д – n_p and α_p ; е – α_p and α_n ; ф – t and α_n

Согласно результатам, представленным на рис. 6, рациональные параметры упрочнения, обеспечивающие достижение максимальной жесткости схемы временных напряжений $(-3,5-4,1)$, включают следующие диапазоны: продольная подача – $0,07-0,08$ мм/об, частота вращения заготовки – $280-300$ об/мин, радиальный натяг – $0,25-0,28$ мм. При этом реверсивная частота вращения рабочего инструмента (РИ) должна составлять $270-300$ дв. ход/мин, начальный угол установки РИ – 90° , а амплитуда угла реверсивного вращения – в пределах $\pm 55-60^\circ$.

Из рис. 6 следует, что при рациональных режимах упрочнения показатель жесткости схемы временных напряжений достигает наилучшего своего значения, при этом $P_{вр} \approx -4$, а при дальнейшем увеличении, например, радиального натяга, частоты вращения заготовки и реверсивной частоты вращения ролика $P_{вр}$ больше 1 приводит к разрушению поверхности заготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате конечно-элементного моделирования процесса реверсивного выглаживания установлено влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния. Результаты исследования свидетельствуют о существенном влиянии ключевых технологических параметров (t ; $S_{пр}$; n_z ; α_n ; α_p ; n_p) на динамику формирования максимальной интенсивности временных напряжений и критерия жесткости схемы напряжений в упрочненных деталях.

Установлены рациональные режимы упрочняющей обработки, при которых достигается максимальная жесткость схемы временных напряжений: $S_{пр}$ в диапазоне $0,07-0,08$ мм/об; n_z в диапазоне $280-300$ об/мин; t в диапазоне $0,25-0,28$ мм; α_n 90° ; α_p в диапазоне $\pm 55-60^\circ$ и n_p в диапазоне $270-300$ дв.ход/мин. Рациональные режимы упрочнения реверсивным выглаживанием позволяют достичь максимально возможной высокой жесткости схемы напряжений, что приводит к улучшению механических характеристик обрабатываемых деталей. Это открывает возможности для более точного управления механическими свойствами материалов и повышения надежности конструкций. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение математических моделей, описывающих процесс реверсивного выглаживания, а также на проведение экспериментальных работ для выявления оптимальных режимов обработки различных материалов.

Список источников

1. Кисленко А.С., Храмцов Р.О. Изменение технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации // Научный Альманах. 2020. № 2-2. С. 48–53. EDN: WKQAOC.
2. Марьина Н.Л., Овчинникова Е.В. Исследование характера отказов кривошипно-шатунного механизма высокофорсированного дизеля // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 3. С. 154–161. EDN: VEJBVX.
3. Чибухчан С.С., Чибухчан О.С., Чибухчан Г.С. Повышение механических свойств тонкостенных деталей транс портных средств и горных машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. № 2. С. 27–33. <https://doi.org/10.31857/S0235711924020043>. EDN: QWINDQ.
4. Нотин И.А., Киселев И.А., Синавчиан С.Н. Влияние метода механической обработки на усталостную прочность деталей машиностроения из дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 6. С. 12–16. https://doi.org/10.30987/article_5ce675a169dde6.03417198. EDN: UVAIRO.
5. Овчинников В.В., Сбитнев А.Г., Поляков Д.А. Влияние размеров литого ядра на свойства точечных соединений алюминиевых сплавов // Технология металлов. 2023. № 10. С. 20–27. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2023-0-10-20-27>. EDN: GXCHOI.
6. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Правка валов поверхностным пластическим деформированием с упругим изгибом заготовки в процессе обработки // Вестник машиностроения. 2020. № 5. С. 62–66. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-5-62-66>. EDN: XOFABQ.
7. Дин Кай Цзянь. Выбор оптимального способа поверхностного пластического деформирования // Интерактивная наука. 2023. № 7. С. 52–54. <https://doi.org/10.21661/r-560324>. EDN: PAOSTN.
8. Savel'ev A.V., Bobrovskii N.M. Dry machining of machine parts: surface plastic deformation // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44. Iss. 2. P. 250–253. <https://doi.org/10.3103/s1068798x24020230>.

9. Гвоздев А.Е., Кузовлева О.В. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических гетерофазных слитковых и порошковых системах и композиционных материалах: монография. Тула: Тульский государственный университет, 2020. 498 с. EDN: USTZWB.
10. Киричек А.В., Баринев С.В., Куканова Н.А. Оценка влияния пластической деформации на коррозионную стойкость сталей // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103. № 10. С. 853–858. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-853-858>. EDN: GUJTNK.
11. Букатый А.С., Букатый С.А. Расчёты деталей на прочность с учётом жёсткости напряжённого состояния // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 1. С. 34–41. <https://doi.org/10.36652/10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41>.
12. Грушко О.В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия: Машиностроение. 2012. № 64. С. 220–226.
13. Митрофанова К.С. Влияние поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом на структурно-фазовое состояние и микротвердость образцов из стали 45 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 3. С. 4–12. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-3-4-12>. EDN: ZCGGKB.
14. Пат. № 2758713, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / С.А. Зайдес, Хыу Хай Нгуен; заявитель и правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021.
15. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние основных параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3. С. 7–15. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-7-15>. EDN: WLQLFZ.
16. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на изменение зеренной структуры углеродистой стали // Черные металлы. 2023. № 6. С. 61–70. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.06.09>. EDN: CJOCDE.
17. Saurabh A., Joshi K., Verma P.C. Load-dependent finite element wear simulation of semi-metallic and ceramic friction materials using ANSYS // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2023. Vol. 76. P. 2473–2482. <https://doi.org/10.1007/s12666-023-02917-1>.
18. Biroş M.T., Andó M., Jeganmohan S. Finite element method modeling of additive manufactured compressor wheel // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2021. Vol. 102. P. 79–85. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00251-8>.
19. Yu Wen Yan, Qiang Lei. Finite element analysis of finishing mill roll based on ANSYS // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 321-324. P. 226–229. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.226>.
20. Фам Д.Ф. Напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими инструментами // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1. № 2. С. 8–17. EDN: VNUJSX.
21. Сивак Р.И., Сивак И.О. Пластичность металлов при сложном нагружении // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия: Машиностроение. 2010. № 60. С. 129–132. EDN: VAXVQN.
22. Букатый А.С., Букатый С.А., Сурков О.С., Сараев А.С. Оптимизация конструкции авиационных деталей на основе критерия жёсткости напряжённого состояния // Материалы пула научно-практических конференций (г. Сочи, 23–27 января 2023 г.). Керчь: КГМУ, 2023. С. 319–321. EDN: ROADZE.
23. Митрофанов Ю.П., Гончарова Е.В., Zhou H., Wilde G., Хоник В.А. Релаксация модуля сдвига в металлическом стекле pd40ni40p20 после пластической деформации кручением под давлением // Релаксационные явления в твердых телах: матер. XXIV Междунар. конф. (г. Воронеж, 24–27 сентября 2019 г.). Воронеж: ВГТУ, 2019. С. 40–41. EDN: JKTIVOS.
24. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Увеличение жизненного цикла изделий при обработке деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 403–408. EDN: RYUJBN.

References

1. Kislenco A.S., Khrantsov R.O. Changing the technical condition of the vehicle during operation. *Nauchnyy Al'manah*. 2020;2-2:48-53. (In Russ.). EDN: WKQAOC.
2. Mar'ina N.L., Ovchinnikova E.V. Studying the failure mode of the crank mechanism of a high-powered diesel engine. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2015;3:154-161. (In Russ.). EDN: VEJBBX.
3. Chibuhchyan S.S., Chibuhchyan O.S., Chibuhchyan G.S. Improving mechanical properties of thin-walled parts of vehicles and mining machines. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2024;2:27-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0235711924020043>. EDN: QWIHDQ.
4. Notin I.A., Kiselev I.A., Sinavchian S.N. Machining impact upon fatigue strength of engineering parts made of dispersion-strengthened composites. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;6:12-16. (In Russ.). https://doi.org/10.30987/article_5ce675a169dde6.03417198. EDN: UVAIRO.
5. Ovchinnikov V.V., Sbitnev A.G., Polyakov D.A. Influence of cast core sizes on properties of point joints of aluminum alloys. *Technology of Metals*. 2023;10:20-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2023-0-10-20-27>. EDN: GXCHOI.

6. Muratkin G.V., Sarafanova V.A. Straightening of shafts by surface plastic deformation with elastic flexure of the workpiece. *Russian Engineering Research*. 2020;5:62-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-5-62-66>. EDN: XOFABQ.
7. Ding Kai Jian. Methodology for choosing an optimal technique for surface plastic forming. *Interactive Science*. 2023;7:52-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.21661/r-560324>. EDN: PAOSTN.
8. Savel'ev A.V., Bobrovskii N.M. Dry machining of machine parts: surface plastic deformation. *Russian Engineering Research*. 2024;44(2):250-253. <https://doi.org/10.3103/s1068798x24020230>.
9. Gvozdev A.E., Kuzovleva O.V. *Extreme effects of strength and ductility in metallic heterophase ingot and powder systems and composite materials*. Tula: Tula State University; 2020, 498 p. EDN: USTZWB.
10. Kirichek A.V., Barinov S.V., Kukanova N.A. Evaluation of the influence of plastic deformation on the corrosion resistance of steels. *Russian Engineering Research*. 2024;103(10):853-858. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-853-858>. EDN: GUJTNK.
11. Bukatyi A.S., Bukatyi S.A. Strength calculation of parts based on stress state stiffness. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022;21(1):34-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41>.
12. Grushko O.V. Stress state parameter taking into account material properties and its effect on plasticity. *Vestnik nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievskij politekhnicheskij institute". Seriya: Mashinostroenie*. 2012;64:220-226. (In Russ.).
13. Mitrofanova K.S. The effect of surface plastic deformation by a multiradius roller on the structural phase state and microhardness of steel 45 samples. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022;3:4-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-3-4-12>. EDN: ZCGGKB.
14. Zaides S.A., Nguen Hyu Haj. *The method of surface plastic deformation of the outer surfaces of solids of revolution*. Patent RF, no. 2758713; 2021. (In Russ.).
15. Zaides S.A., Nguen Hyu Haj. The influence of the main parameters of the reversible surface plastic deformation on the stress-strain state of cylindrical parts. *Systems. Technologies*. 2022;3:7-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-7-15>. EDN: WLQLFZ.
16. Zaides S.A., Nguen Hyu Haj. Influence of reversible surface plastic deformation on changes in the grain structure of carbon steel. *Chernye metally*. 2023;6:61-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2023.06.09>. EDN: CJOCDE.
17. Saurabh A., Joshi K., Verma P.C. Load-dependent finite element wear simulation of semi-metallic and ceramic friction materials using ANSYS. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023;76:2473-2482. <https://doi.org/10.1007/s12666-023-02917-1>.
18. Birosz M.T., Andó M., Jeganmohan S. Finite element method modeling of additive manufactured compressor wheel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2021;102:79-85. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00251-8>.
19. Yu Wen Yan, Qiang Lei. Finite element analysis of finishing mill roll based on ANSYS. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;321-324:226-229. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.226>.
20. Pham D.Ph. Stressedly-deformed state of cylindrical parts at transverse rolling by flat tool. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2015;1(2):8-17. (In Russ.). EDN: VNUJSX.
21. Sivak R.I., Sivak I.O. Metal plasticity under complex loading. *Vestnik nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievskij politekhnicheskij institute". Seriya: Mashinostroenie*. 2010;60:129-132. (In Russ.). EDN: VAXVQN.
22. Bukatyj A.S., Bukatyj S.A., Surkov O.S., Saraev A.S. Optimization of aircraft part design based on stress state stiffness criterion. In: *Materialy pula nauchno-prakticheskikh konferencij = Proceedings of the pool of scientific and practical conferences*. 23–27 January 2023, Sochi. Kerch': Kerch State Maritime Technological University; 2023, p. 319-321. (In Russ.). EDN: ROADZE.
23. Mitrofanov Yu.P., Goncharova E.V., Zhou H., Wilde G., Khonik V.A. Relaxation of the shear modulus in metallic glass pd40ni40p20 after plastic deformation by torsion under pressure. In: *Relaksacionnye yavleniya v tverdyh telah: materialy XXIV Mezhdunarodnoj konferencii = Relaxation phenomena in solids: proceedings of the 24th International conference*. 24–27 September 2019, Voronezh. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2019, p. 40-41. (In Russ.). EDN: JKTVOs.
24. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Increase in the life cycle of products when processing parts by dynamic methods of surface plastic deformation. *Automation. Modern technologies*. 2018;72(9):403-408. (In Russ.). EDN: RYUJBN.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Хью Хай,

к.т.н., преподаватель,
Офицерское училище Военно-Воздушных Сил,
57163, г. Нячанг, ул. Бьетхы, 3, Вьетнам
✉ nquan6799@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7909-385X

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Huu Hai Nguyen,

Cand. Sci. (Eng.), Lecturer,
Air Force Officer College,
3 Biet Thu St., Nha Trang 57163, Viet Nam
✉ nquan6799@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7909-385X

Зайдес Семен Азикович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры материаловедения,
сварочных и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
zsa@istu.edu
orcid.org/0000-0001-9416-7749

Semen A. Zaides,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
zsa@istu.edu
orcid.org/0000-0001-9416-7749

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 15.02.2025 г.; принята к публикации 26.04.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 15.02.2025; accepted for publication 26.04.2025.