
МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО
ТВЕРДОГО ТЕЛА
DEFORMATION
IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267>

УДК 621.787 (04)

Численное исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в контактной задаче поверхностного дорнования отверстий

Доктора техн. наук, профессора Н. С. Сивцев¹⁾, В. В. Тарасов²⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
(Ижевск, Российская Федерация),

²⁾Институт механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения
Российской академии наук (Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В последние годы экономический фактор играет все более важную роль при выборе технологий изготовления деталей машин с заданными значениями нормируемых параметров геометрической точности и качества рабочих поверхностей. Применительно к процессам поверхностного пластического деформирования это проявляется в поиске эффективных приемов управления трением в паре «инструмент – заготовка», которое, в конечном итоге, определяет картину распределения и величину напряжений и деформаций в заготовке и инструменте. Получить строгое аналитическое решение задачи по установлению связи между условиями на поверхности, трением и напряженно-деформированным состоянием контактируемых тел не представляется возможным. В этой связи на передний план выходит построение математических моделей, решение которых возможно численными методами. В статье приводятся результаты численного исследования (вычислительного эксперимента) конечно-элементной модели деформирования заготовки в различных условиях контактного взаимодействия и трения одним из методов поверхностного пластического деформирования – поверхностным дорнованием отверстий. Критерием оценки условий контактного взаимодействия и трения выбран коэффициент трения. Показано, что изменение коэффициента трения в процессе поверхностного дорнования не оказывает заметного влияния на формирование поля напряжений в деформируемой заготовке как в осевом, так и в радиальном и окружном направлениях. Вместе с тем при повышении коэффициента трения в паре «инструмент – заготовка» и соответственно силы механического сопротивления деформации заготовки наблюдается их рост. Вычислительным экспериментом подтверждено наличие внеконтактных деформаций заготовки и инструмента при поверхностном дорновании, а также снижение величины остаточных деформаций в заготовке с уменьшением коэффициента трения. Оценка баланса перемещений контактных поверхностей заготовки (внутренняя поверхность обрабатываемого отверстия) и инструмента показала, что деформации инструмента в упругой области могут привести к существенному снижению реального натяга поверхностного дорнования отверстий.

Ключевые слова: инструмент, заготовка, поверхностное деформирование, математическая модель, трение, напряжения, деформации, поверхностное дорнование

Для цитирования: Сивцев, Н. С. Численное исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в контактной задаче поверхностного дорнования отверстий / Н. С. Сивцев, В. В. Тарасов // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 259–267. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267>

Адрес для переписки

Сивцев Николай Сергеевич
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 7,
426011, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +8 3412 77-20-74
sivcevns@mail.ru

Address for correspondence

Sivtsev Nikolai S.
Kalashnikov Izhevsk
State Technical University
7, Studencheskaya str.,
426011, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +8 3412 77-20-74
sivcevns@mail.ru

Numerical Study of Stress-Strain State of Workpiece in Contact Problem of Surface Mandrel Drilling

N. S. Sivtsev¹⁾, V. V. Tarasov²⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation),

²⁾Institute of Mechanics of the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. In recent years, the economic factor has played an increasingly important role in the selection of technologies for manufacturing machine parts with specified values of normalized parameters of geometric accuracy and quality of working surfaces. As applied to surface plastic deformation processes, this is noticeably manifested in the search for effective friction control methods in the “tool – workpiece” pair, which ultimately determines the distribution pattern and the magnitude of stresses and strains in the workpiece and the tool. It is not possible to obtain a rigorous analytical solution to the problem of establishing a connection between surface conditions, friction, and the stress-strain state of the contacted bodies. In this regard, the construction of mathematical models comes to the fore, the solution of which is possible by numerical methods. The paper presents the results of a numerical study (computational experiment) of a finite-element model of workpiece deformation under various conditions of contact interaction and friction by one of the methods of surface plastic deformation – surface mandrel drilling. The friction coefficient has been chosen as the criterion for assessing the conditions of contact interaction and friction. It is shown that a change in the friction coefficient in the process of surface mandrel has no noticeable effect on the formation of a stress field in the deformable workpiece both in the axial, and in the radial and circumferential directions. At the same time, with an increase in the value of the friction coefficient in the “tool – workpiece” pair and with the associated increase in the force of mechanical resistance to deformation of the workpiece, their growth is observed. A computational experiment has confirmed the presence of non-contact deformations of the workpiece and tool during surface mandrel drilling, as well as a decrease in the value of residual deformations in the workpiece with a decrease in the coefficient of friction. Balance assessment of contact surface displacements in the workpiece (the inner surface of the hole to be machined) and the tool (mandrel) has shown that the deformations of the tool in the elastic region can lead to a significant decrease in the real tightness of surface mandrel drilling.

Keywords: tool, workpiece, surface deformation, mathematical model, friction, stresses, strains, surface mandrel

For citation: Sivtsev N. S., Tarasov V. V. (2021) Numerical Study of Stress-Strain State of Workpiece in Contact Problem of Surface Mandrel Drilling. *Science and Technique*. 20 (3), 259–267. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267> (in Russian)

Введение

К методам обработки поверхностным пластическим деформированием, широко применяемым для повышения точности, износостойкости и усталостной прочности деталей машин, относится поверхностное дорнование цилиндрических отверстий [1–7].

Известно, что одним из важнейших факторов, обеспечивающих повышение эффективности процесса дорнования в целом, является вид напряженного состояния заготовки, непосредственно зависящий от контактного трения в очаге деформации. Управление контактным трением может достигаться различными приемами: подбором свойств смазочного материала, изменением схемы подачи смазки в очаг деформации, а также кинематики относительно движения в паре «инструмент – заготовка» (дополнительное вращение, вибрация и т. п.), а в некоторых случаях – изменением схемы

фиксации заготовки (в частности, схемы ее осевого растяжения или сжатия) [8–10].

Многофакторность явлений на контакте инструмента и заготовки не позволяет дать строгое аналитическое описание напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки при поверхностном дорновании. По этой причине разработанные математические модели деформирования заготовок основываются на упрощенных моделях взаимодействия неровностей контактирующих поверхностей и усредненных схемах их фрикционного нагружения.

В последние десятилетия благодаря высокому уровню развития вычислительной техники при оценке характера НДС в механике деформируемого твердого тела применительно к пространственным задачам находят широкое применение численные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ) [11–14]. На сегодняшний день МКЭ – эффективный инструмент для решения широкого класса задач,

оснащенный развитым пакетом программного обеспечения для расчета НДС деформируемого тела практически любой конфигурации в условиях сложного нагружения. Это позволяет использовать его для построения и изучения математических моделей контактных задач, в том числе применительно к процессу поверхностного дорнования [15–18].

В [19] предложена модель анизотропного трения инструмента с заготовкой взамен упрощенных, идеализирующих контактирующие поверхности, на основе которой разработаны конечно-элементная модель деформирования заготовки при поверхностном дорновании и вычислительный алгоритм [20]. Ниже приводятся результаты численного исследования НДС заготовки с использованием этой модели в пакете специально разработанных программ.

Изучался характер напряженного состояния цилиндрических заготовок следующих размеров: центральное сквозное отверстие диаметром 45 мм (номинальный размер), длина $L = 40$ мм, наружный диаметр варьировался в диапазоне 54–112 мм. Заготовка деформировалась в условиях осевого сжатия. Параметры поверхности заготовок: наибольшая высота профиля неровностей $R_{z\text{зар}} = 3,2$ мкм, шаг и высота волнистости соответственно $S_w = 7$ мм и $W_z = 6,5$ мкм, отклонение профиля продольного сечения $\Delta = 0,02$ мм. Материал заготовок – сталь 45 (ГОСТ 1050–74) после нормализации, ее физико-механические характеристики: $\sigma_s = 360$ МПа, $E = 206250$ МПа, $\mu = 0,3$. Отдельные вычислительные эксперименты проведены для заготовок, изготовленных из сталей 20 (ГОСТ 1050–74) ($\sigma_s = 250$ МПа), 20X и 40X (ГОСТ 4543–71) ($\sigma_s = 600$ МПа и $\sigma_s = 800$ МПа соответственно). Для определения интенсивности напряжений с учетом упрочнения материала использованы действительные диаграммы деформирования сталей [21].

Наибольшая высота профиля неровностей рабочей поверхности инструмента (дорна) $R_z = 0,8$ мкм, внутренний диаметр 22 мм. Материал инструмента – сталь P18 (ГОСТ 19265–73) в термообработанном состоянии ($\sigma_s = 2480$ МПа, $E = 228000$ МПа, $\mu = 0,3$).

Изменяли: натяг поверхностного дорнования N_d в диапазоне 0,08–0,28 мм, углы переднего α и обратного α_1 конусов инструмента от $0,5^\circ$ до 20° , ширину цилиндрической (калибрующей) ленточки b от 1 до 5 мм (рис. 1).

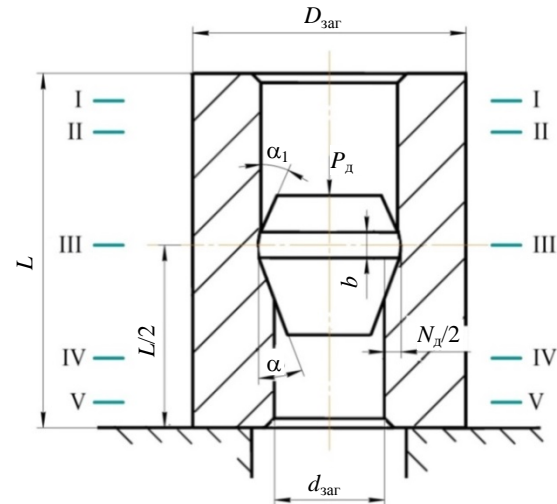


Рис. 1. Радиальные сечения заготовки, исследуемые в численном эксперименте:
 P_d – сила поверхностного дорнования

Fig. 1. Radial sections of workpiece investigated in numerical experiment:
 P_d – force of surface mandrel

Максимальный натяг дорнования во всех случаях ограничивался упругопластическими деформациями заготовки (степень деформации менее 1 %). Коэффициент трения f варьировали от 0 до 0,26. Достоверность результатов моделирования сравнивали с экспериментальными данными, полученными разными авторами [1–10].

Напряжения в заготовке в процессе и после поверхностного дорнования

Анализируя результаты численного исследования напряженного состояния заготовки в процессе и после поверхностного дорнования, можно сделать следующие предварительные выводы.

1. В процессе поверхностного дорнования при перемещении инструмента по обрабатываемому отверстию от свободного торца к опорному напряжения в заготовке растут, достигая предельного уровня в сечении III–III (рис. 2), наиболее удаленном от торцов, где влияние внешних зон минимально.

2. Концентрация напряжений (с максимальными радиальными) сосредоточена главным образом в зонах перехода переднего и обратного конусов с калибрующей ленточкой инстру-

мента (рис. 3). Изменить уровень напряжений можно путем варьирования ширины ленточки (рис. 2) либо увеличения радиуса скругления инструмента в переходном сечении.

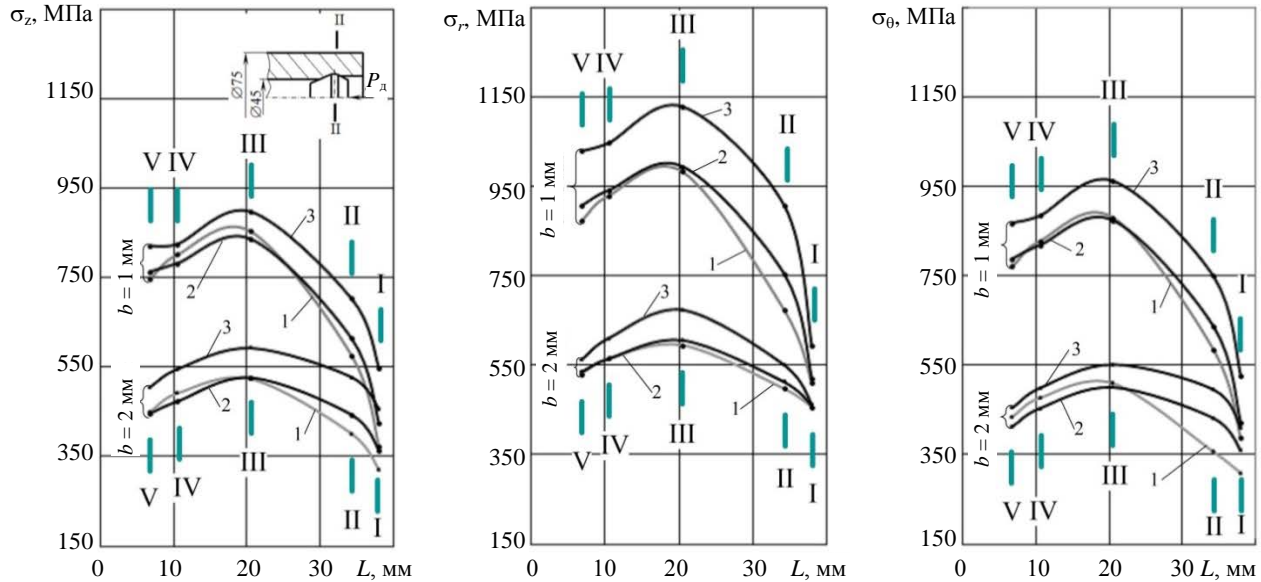


Рис. 2. Характер изменения максимальных осевых σ_z , радиальных σ_r и окружных σ_θ напряжений в заготовке в процессе поверхностного дорнования: 1 – $f = 0$; 2 – $f = 0,12$; 3 – $f = 0,26$ ($N_d = 0,08$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

Fig. 2. Nature of change in maximum axial σ_z , radial σ_r and circumferential σ_θ stresses in workpiece during surface mandrel: 1 – $f = 0$; 2 – $f = 0,12$; 3 – $f = 0,26$ ($N_d = 0,08$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

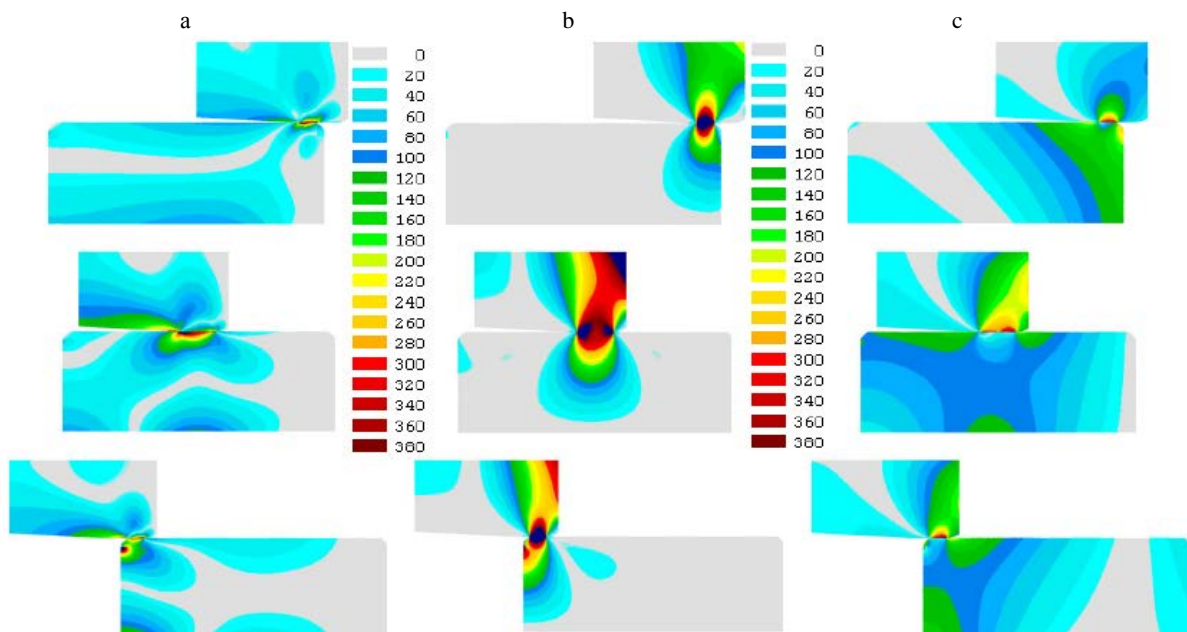


Рис. 3. Поля осевых (а), радиальных (б) и окружных (с) напряжений в заготовке в процессе поверхностного дорнования ($N_d = 0,08$ мм, $b = 5$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 3. Fields of axial (a), radial (b) and circumferential (c) stresses in workpiece during surface mandrel ($N_d = 0,08$ мм, $b = 5$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

3. После обработки поверхностным дорнованием остаточные напряжения (осевые, радиальные и окружные) локализуются в поверхностном слое обработанного отверстия, причем их изменение по толщине этого слоя немонотонно (рис. 4). Последнее хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины [4, с. 212].

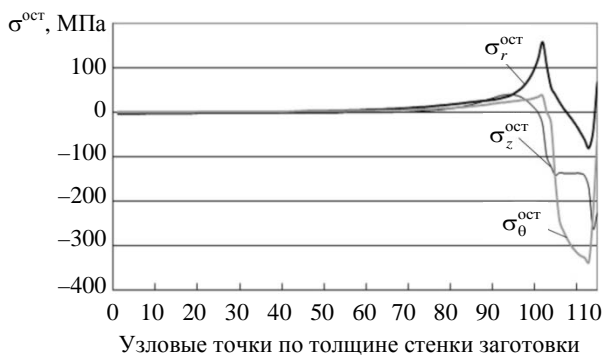


Рис. 4. Характер изменения остаточных напряжений по толщине стенки заготовки после поверхностного дорнования ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 4. Nature of change in residual stresses along wall thickness of workpiece after surface mandrel

($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0.12$)

4. На обработанной поверхности остаточные напряжения в окружном направлении превосходят осевые (рис. 4), однако закономерности их изменения имеют общий схожий (повторяют) характер при изменении факторов процесса поверхностного дорнования. Правильность этого утверждения подтверждена опытным путем [4, с. 214].

5. Увеличение коэффициента трения при поверхностном дорновании не оказывает влияния на характер распределения напряжений в осевом, радиальном и окружном направлениях, однако изменяет их уровень (рис. 5). Такая картина наблюдается при различных сочетаниях конструкторско-технологических параметров процесса деформирования: степени деформации (натяг поверхностного дорнования), материала заготовки и ее размеров, геометрии ин-

струмента (рис. 6). В рамках выбранных для моделирования значений изменения данных факторов этот рост достигал 14 %.

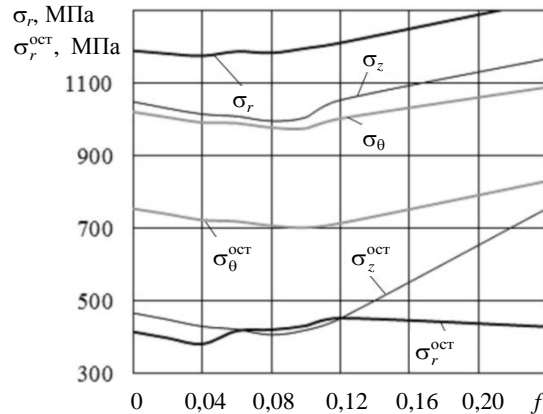


Рис. 5. Уровень максимальных напряжений в заготовке в процессе (σ_r) и после поверхностного дорнования ($\sigma_r^{\text{ост}}$) при варьировании коэффициента трения ($N_d = 0,08$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, сечение III–III)

Fig. 5. Maximum stress level in workpiece in process (σ_r) and after surface mandrel (σ_r^{after}) with varying coefficient of friction ($N_d = 0.08$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, section III–III)

Деформации в заготовке и инструменте

Учитывая, что в процессе поверхностного дорнования максимальные значения напряжений сосредоточены в переходных зонах (рис. 3), максимальные деформации заготовки и инструмента также будут происходить в этих зонах, причем вполне очевидно, что общий баланс деформаций пары «инструмент – заготовка» в точках контакта функционально всегда равен натягу дорнования. Как показали численные исследования, соотношение величин этих деформаций в процессе поверхностного дорнования меняется. С ростом напряжений при удалении инструмента от свободного торца (рис. 2) деформации в заготовке уменьшаются, а в инструменте увеличиваются. При приближении инструмента к опорному торцу и снижении напряжений наблюдается обратная картина – деформации в заготовке увеличиваются, а в инструменте уменьшаются.

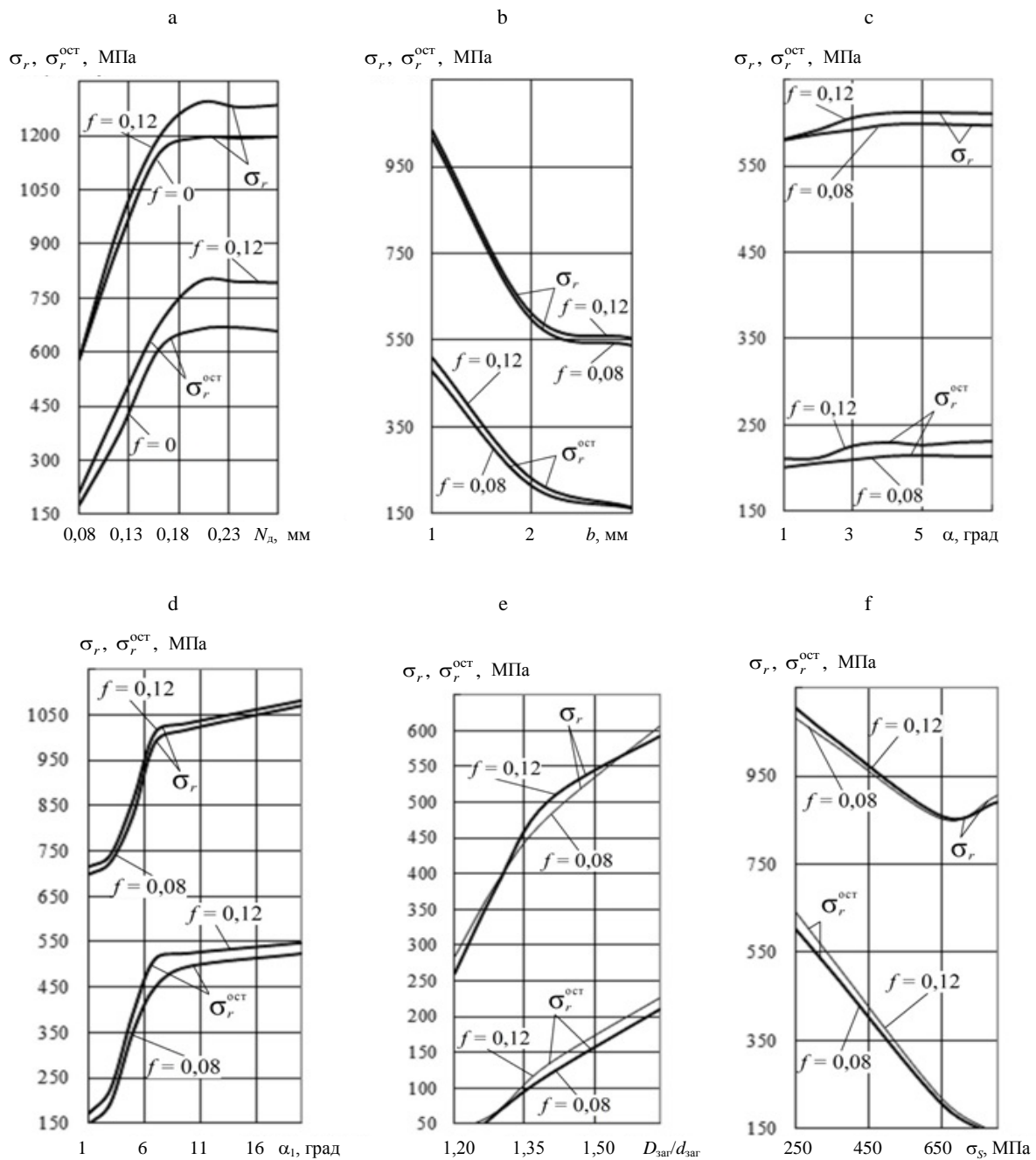


Рис. 6. Абсолютные значения максимальных радиальных напряжений в заготовке в процессе (σ_r) и после обработки (σ_r^{oct}) при вариации величины коэффициента трения в зависимости от: а – натяга ($b = 2$ мм, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); б – ширины цилиндрической ленточки инструмента ($N_d = 0,08$ мм, $\alpha = 7^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); в – угла переднего конуса инструмента ($N_d = 0,08$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha_1 = 10^\circ$); д – угла обратного конуса инструмента ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$); е – толщины стенки заготовки ($N_d = 0,08$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); ф – механических свойств обрабатываемого материала ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

Fig. 6. Absolute values of maximum radial stresses in workpiece during the process (σ_r) and after processing (σ_r^{after}) with variation in value of friction coefficient depending on: а – tension ($b = 2$ mm, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); б – width of cylindrical ribbon tool ($N_d = 0.08$ mm, $\alpha = 7^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); в – angle of front tool cone ($N_d = 0.08$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha_1 = 10^\circ$); д – angle of inverse tool cone ($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$); е – wall thickness of workpiece ($N_d = 0.08$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$); ф – mechanical properties of processed material ($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$)

Выявленную закономерность изменения деформаций затруднительно объяснить только изменением уровня напряжений в заготовке и инструменте. Для ее точного понимания необходимо рассмотрение более сложной модели, учитывающей эффект (явление) внеконтактной деформации заготовки при поверхностном дорновании, обнаруженный авторами [4]. Эффект внеконтактной деформации приводит к уменьшению теоретической (расчетной) длины контакта переднего конуса инструмента с заготовкой $l_{к.т}$ до ее фактического значения $l_{к.ф}$ (рис. 7).

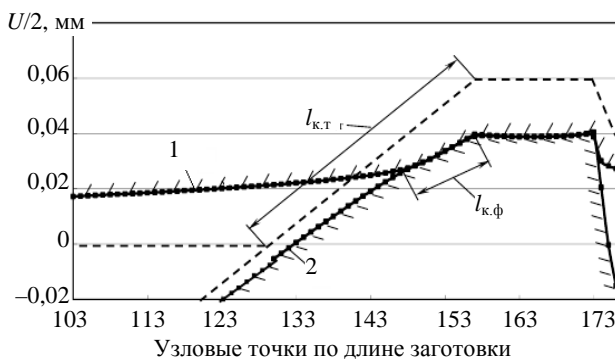


Рис. 7. Волна внеконтактной деформации U заготовки 1 в зоне переднего конуса инструмента 2 при поверхностном дорновании ($N_d = 0,12$ мм, $b = 2$ мм, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 7. Wave of non-contact deformation U of workpiece 1 in the area of front cone of tool 2 during surface mandrel ($N_d = 0.12$ mm, $b = 2$ mm, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0.12$)

В настоящем исследовании установлено, что в процессе поверхностного дорнования (рис. 8) при постоянном натяге длина $l_{к.ф}$ увеличивается и достигает максимума при выходе инструмента в сечение III–III заготовки (рис. 1) при экстремальном уровне напряжений (рис. 2).

В сечении III–III деформации внутренней поверхности заготовки имеют минимальное значение. Приближение инструмента к опорному торцу приводит к падению уровня напряжений в заготовке и уменьшению $l_{к.ф}$, но деформации при этом растут. Это указывает на то, что максимальные значения деформаций в заготовке и инструменте зависят не только от уровня напряжений, но и от величины $l_{к.ф}$.

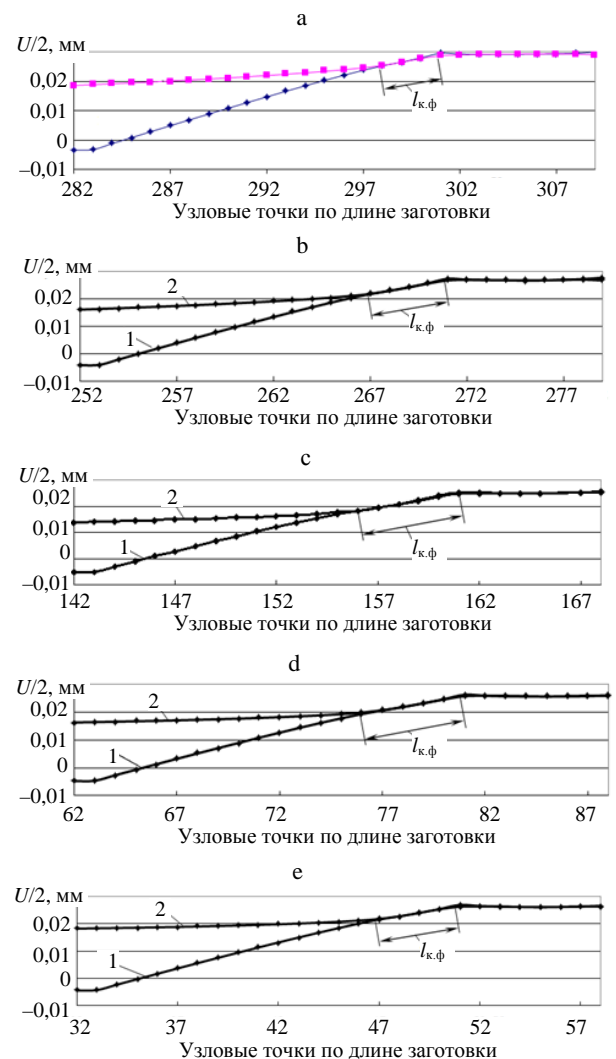


Рис. 8. Фактическая длина контакта пары «инструмент 1 – заготовка 2» по переднему конусу в процессе поверхностного дорнования в сечениях (рис. 1): а – I–I; б – II–II; в – III–III; д – IV–IV; е – V–V ($N_d = 0,08$ мм, $b = 1$ мм, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0,12$)

Fig. 8. Actual contact length of “tool 1 – workpiece 2” pair along front cone during surface mandrel in sections (Fig. 1): а – I–I; б – II–II; в – III–III; д – IV–IV; е – V–V ($N_d = 0.08$ mm, $b = 1$ mm, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$, $f = 0.12$)

Характер нагружения заготовки в процессе поверхностного дорнования непосредственно влияет и на уровень радиальной остаточной деформации по обработанному отверстию. С улучшением условий трения (уменьшением величины коэффициента трения) величина этой деформации снижается.

ВЫВОДЫ

1. Поверхностное дорнование отверстий сопровождается повышенным уровнем напряже-

ний в зоне цилиндрической ленточки инструмента. Уровень напряжений может быть снижен за счет увеличения ширины ленточки, а также радиуса переходного участка в зоне сопряжения с передним конусом. Это позволяет влиять на напряженное состояние заготовки путем изменения геометрии деформирующего инструмента.

2. Анализ показал, что после поверхностного дорнования экстремальные значения остаточных напряжений фиксируются в поверхностных слоях заготовки, при этом окружные остаточные напряжения имеют наибольшие по модулю значения. Отмечено, что по мере удаления от обрабатываемой поверхности окружные остаточные напряжения меняют знак на противоположный.

3. Возможность расчета численным методом интенсивности напряжений в заготовке в процессе поверхностного дорнования позволяет производить оценку параметров качества поверхностного слоя обработанных цилиндрических отверстий (степень наклепа и глубину упрочнения).

4. В диапазоне значений исследуемых параметров процесса поверхностного дорнования повышение уровня напряжений в теле заготовки при увеличении коэффициента трения достигало 14 %. Это подтверждает возможность управления напряженно-деформированным состоянием заготовки и параметрами процесса за счет направленного управления условиями контактного взаимодействия и трения инструмента с заготовкой.

5. Основываясь на оценке баланса деформаций контактных поверхностей в паре «инструмент – заготовка», показано, что деформации могут привести к существенному снижению натяга поверхностного дорнования, реальная величина которого изменяется по ходу процесса и зависит от напряжений и фактической длины контакта переднего конуса инструмента с заготовкой.

6. В ходе численного исследования подтвержден эффект внеконтактной деформации заготовки, обнаруженный ранее экспериментально [4], что подтверждает адекватность разработанной модели. Также установлен факт внеконтактной деформации инструмента. Учет этих деформаций необходим для правильного

назначения режима обработки и прогнозирования выходных параметров процесса.

7. Вычислительным экспериментом подтверждено, что уменьшение силы трения в процессе поверхностного дорнования приводит к снижению остаточных деформаций в заготовке после ее обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков. М.: Свердловск: Машгиз, 1961. 192 с.
2. Проскуряков, Ю. Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскуряков. М.: Машиностроение, 1971. 208 с.
3. Монченко, В. П. Эффективная технология производства полых цилиндров / В. П. Монченко. М.: Машиностроение, 1980. 248 с.
4. Розенберг, А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. Киев: Наукова думка, 1990. 320 с.
5. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование цилиндрических отверстий с большими натягами / Ю. Г. Проскуряков, Г. И. Шельвинский. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1982. 168 с.
6. Исаев, А. Н. Совершенствование процессов дорнования отверстий трубчатых заготовок / А. Н. Исаев. Ростов н/Д., 2005. 399 с.
7. Охотин, И. С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами / И. С. Охотин. Томск, 2010. 16 с.
8. Янченко, И. И. Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием: в 2 ч. / И. И. Янченко, В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2002. Ч. 1. Теория управления контактно-кинематическими условиями при дорновании. 138 с.
9. Янченко, И. И. Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием: в 2 ч. / И. И. Янченко, В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. Ижевск: Изд-во УдНЦ УрО РАН, 2002. Ч. 2. Влияние контактно-кинематических условий на качество деталей и соединений. 163 с.
10. Сорокин, В. М. Особенности обработки цилиндрических отверстий в деталях дорнованием (протягиванием) с противодействием технологических жидкостей / В. М. Сорокин, Н. М. Тудакова, В. В. Крайнов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 4. С. 13–17.
11. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. под ред. Б. Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.
12. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. под ред. Н. С. Бахвалова. М.: Мир, 1986. 318 с.
13. Maga, D. Numerické Riesenia / D. Maga, R. Hartyansky. Brno, Czech Rep.: Univerzita Obrany, 2006. 174 p.
14. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Примеры / Р. Галлагер; пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.
15. Лузгин, А. А. Теоретические основы математического моделирования процесса калибровки отверстий в режиме жидкостного трения / А. А. Лузгин. Ижевск, 2006. 138 с.

16. Тудакова, Н. М. Моделирование процессов комплексной обработки отверстий / Н. М. Тудакова, О. И. Кутилова, В. В. Крайнов // Труды НГТУ имени П. Е. Алексеева. 2012. Т. 94, № 1. С. 87–93.
17. Лебедев, А. Р. Моделирование геометрических параметров очага деформирования при дорновании отверстий / А. Р. Лебедев, А. Н. Исаев, С. В. Власкин // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. статей 11 Междунар. науч.-практ. конф. в рамках Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2018». С. 186–189.
18. Математическая модель для прогнозирования сил дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях давления металлоплакирующих смазок / А. В. Щедрин [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 2. С. 71–76.
19. Тарасов, В. В. Моделирование трения в технологических процессах обработки металлов / В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2006. 166 с.
20. Václav, S. Investigation of Stress-Strain State of the Workpiece when the Gauge Processing in her Holes Burnishing / S. Václav, N. S. Sivtsev, K. Senderská // Advances in Science and Technology Research Journal. 2017. Vol. 11, No 3. P. 211–222. <https://doi.org/10.12913/22998624/76093>.
21. Полухин, И. П. Соппротивление пластической деформации металлов и сплавов / И. П. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. М.: Металлургия, 1976. 488 с.
9. Yanchenko I. I., Tarasov V. V., Sivtsev N. S. (2002) *Technological Basis for Machining Precise Holes by Mandrel. Part 2. The influence of Contact-Kinematic Conditions for the Quality of Parts and Connections*. Izhevsk, Publishing House of Udmurt Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 163 (in Russian).
10. Sorokin V. M., Tudakova N. M., Krainov V. V. (2015) Features of Processing Cylindrical Holes in Parts by Mandrel (Pulling) with Backpressure of Process Fluids. *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (4), 13–17 (in Russian).
11. Zenkevich O. (1975) *Finite Element Method in Engineering*. Moscow, Mir Publ. 541 (in Russian).
12. Zenkevich O., Morgan K. (1986) *Finite Elements and Approximation*. Moscow, Mir Publ. 318 (in Russian).
13. Maga D., Hartyansky R. (2006) *Numerické Riesenia*. Brno, Czech Rep., Univerzita Obrany. 174.
14. Gallagher R. (1984) *Finite Element Method. Examples*. Moscow, Mir Publ. 428 (in Russian).
15. Luzgin A. A. (2006) *Theoretical Foundations of Mathematical Modeling of Hole Calibration Process in Liquid Friction Mode*. Izhevsk. 138 (in Russian).
16. Tudakova N. M., Kutilova O. I., Krainov V. V. (2012) Simulation of Integrated Hole Machining Processes. *Trudy NGTU imeni R. E. Alekseeva = Transactions of NNSTU name after R.E. Alekseev*, 94 (1), 87–93 (in Russian).
17. Lebedev A. R., Isaev A. N., Vlaskin S. V. (2018) Modeling the Geometric Parameters of the Deformation Zone During Mandrel Drilling. *Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya Sel'skokhozyaistvennogo Mashinostroeniya: Sb. Statei 11 Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. v Ramkakh Mezhdunar. Agroprom. Vystavki "Interagromash-2018"* [State and Prospects for the Development of Agricultural Engineering: Collection of Papers of the 11th Scientific-Practical Conference in the Framework of International Agroindustrial Exhibition "Interagromash-2018"], 186–189 (in Russian).
18. Shchedrin A. V., Klimochkin K. O., Bekaev A. A., Pomytkin V. A. (2019) Mathematical Model for Predicting the Forces of Mandrel Holes with a Tool Having Regular Microgeometry of the Surface under Pressure of Metal-Plating Lubricants. *Sborka v Mashinostroenii, Priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making*, (2), 71–76 (in Russian).
19. Tarasov V. V., Sivtsev N. S. (2006) *Modeling of Friction in Technological Processes of Metal Processing*. Izhevsk: Publishing House of Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 166 (in Russian).
20. Václav S., Sivtsev N. S., Senderská K. (2017) Investigation of Stress-Strain State of the Workpiece when the Gauge Processing in her Holes Burnishing. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11 (3), 211–222. <https://doi.org/10.12913/22998624/76093>.
21. Polukhin I. P., Gun G. Ya., Galkin A. M. (1976) *Resistance of Metals and Alloys to Plastic Deformation*. Moscow, Metallurgiya Publ. 488 (in Russian).

Поступила 10.02.2020
Подписана в печать 19.05.2020
Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Proskuryakov Yu. G. (1961) *Burnishing of Holes*. Moscow-Sverdlovsk, Mashgiz Publ. 192 (in Russian).
2. Proskuryakov Yu. G. (1971) *Technology of Work Hardening, Calibration and Forming of Metals*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 208 (in Russian).
3. Monchenko V. P. (1980) *Effective Technology for the Production of Hollow Cylinders*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 248 (in Russian).
4. Rosenberg A. M., Rosenberg O. A. (1990) *The Mechanics of Plastic Deformation in the Process of Cutting and Deforming Broaching*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 320 (in Russian).
5. Proskuryakov Yu. G., Shelvinsky G. I. (1982) *Burnishing of Cylindrical Holes with High Interference*. Rostov, Publishing House of Rostov University. 168 (in Russian).
6. Isaev A. N. (2005) *Improving the Processes of Mandrel Drilling of Tubular Blanks*. Rostov-on-Don. 399 (in Russian).
7. Okhotin I. S. (2010) *Rugging of Deep Holes of Small Diameter in Hollow Thick-Walled Cylinders with Large Interference*. Tomsk. 16 (in Russian).
8. Yanchenko I. I., Tarasov V. V., Sivtsev N. S. (2002) *Technological Basis for Machining Precise Holes by Mandrel. Part 1. Control Theory of Contact-Kinematic Conditions During Mandrel*. Izhevsk. Publishing House of Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 138 (in Russian).

Received: 10.02.2020
Accepted: 19.05.2020
Published online: 31.05.2021