ISSN 2500-1590 (online)

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья УДК 621.77.014 https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548



Численный расчет напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного нагружения

Николай Валерьевич Вулых^{1⊠}, Александр Николаевич Вулых²

- ¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
- 2 Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, Иркутский район, Россия
- ¹ vulix2011@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2607-4302

Аннотация. Цель – установить геометрию формоизменения модели микронеровностей на рабочих поверхностях деталей при степенях деформирования, сопоставимых с высотой исходного микропрофиля; выявить влияние степени осадки микропрофиля на изменение его формы при стесненных условиях нагружения; оценить напряженное состояние микропрофиля по интенсивности напряжений. Для расчета численной модели микропрофиля на поверхностях деталей использована программная среда ANSYS Workbench. В качестве материала микропрофиля применяли свинец, олово, алюминий и медь. Разработана компьютерная модель осадки микропрофиля при стесненных условиях нагружения. Установлено, что поднятие дна впадины начинается при осадке микропрофиля величиной 10-20% и достигает значений 0,213-0,275 мм от первоначальной высоты профиля в зависимости от его материала. Относительная длина сглаженного участка микропрофиля достигает 0,786-0,925 мм от его первоначальной длины. Угол при основании деформированного микропрофиля достиг 570 – для моделей из меди, и 800 – для моделей из свинца. Глубина пустот составляет от 1,4 мм – 23% от первоначальной высоты профиля для моделей из свинца, и 1,8 мм – 30% от первоначальной высоты профиля для моделей из меди. При максимальной осадке микропрофиля увеличение предела текучести материала микронеровностей с 10 до 60 МПа способствует снижению как угла при основании деформированного микропрофиля, так и относительной длины и вертикального подъема максимальной точки впадин микропрофиля. Установлено, что смыкания боковых поверхностей микропрофиля не произошло. Напряженное состояние микропрофиля при осадке на 50% превысило предел его прочности в 4-8 раз. Представлен характер формоизменения микропрофиля, смоделированного из пластичных металлических материалов. Установлено, что численный расчет хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований по моделям микропрофиля, выполненным из свинца. Необходимо отметить, что полное выглаживание микропрофиля, вероятно, произойдет от поднятия впадин и сближения его боковых поверхностей. Результаты исследования полезно использовать при проектировании и изготовлении затворных узлов трубопроводной арматуры.

Ключевые слова: микропрофиль поверхностей, моделирование шероховатости, конечно-элементное моделирование, упругопластическая деформация, стесненное деформирование

Для цитирования: Вулых Н. В., Вулых А. Н. Численный расчет напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного нагружения // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 538–548. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548.

-

²alexxx43zet@mail.ru

[©] Вулых Н. В., Вулых А. Н., 2021

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Stress-strain numerical simulation for a microprofile subjected to orthogonal impact under constrained loading conditions

Nikolay V. Vulykh^{1⊠}, Alexander N. Vulykh²

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky, Irkutsk district, Russia

¹vulix2011@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2607-4302

Abstract. The present paper aims to describe shape changes in a microroughness model developed for the working surfaces of parts at degrees of deformation commensurate with the height of the original microprofile; to establish how the degree of microprofile upsetting affects its shape under constrained loading conditions; as well as to estimate the stress state of the microprofile by stress intensity. A numerical model describing the surface microprofile of parts was calculated using the ANSYS Workbench environment. Lead, tin, aluminum, and copper were used as microprofile materials. In addition, microprofile upsetting was computer simulated under constrained loading conditions. The valley bottom was found to rise at a 10-20% microprofile upsetting by 0.213-0.275 mm relative to the original profile height, depending on its material. The relative length of the smoothed microprofile section amounted to 0.786-0.925 mm of its original length. The base angle of the deformed microprofile reached 57⁰ and 80⁰ for copper and lead models, respectively. The depth of valleys ranged from 1.4 mm (23% of the original profile height) for lead models and from 1.8 mm (30% of the original profile height) for copper models. In the case of maximum microprofile upsetting, an increase in the yield strength of microrough material from 10 to 60 MPa contributed to a reduction in the base angle of the deformed microprofile, as well as relative length and the vertical rise of microprofile valleys at their highest point. No interlocking of lateral microprofile surfaces was observed. At a 50% upsetting, the stress state of the microprofile exceeded its ultimate strength by 4-8 times. The shape changes simulated for the microprofile from plastic metallic materials are described. The performed numerical simulation correlates well with the experimental results obtained for lead microprofile models. It is worth noting that the complete smoothing of the microprofile is likely to occur through the rise of valleys and the approaching of its lateral surfaces. The study results can be used for designing and manufacturing valve gate assemblies.

Keywords: surface microprofile, roughness modeling, finite-element modeling, elasto-plastic strain, constrained deformation

For citation: Vulykh N. V., Vulykh A. N. Stress-strain numerical simulation for a microprofile subjected to orthogonal impact under constrained loading conditions. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):538-548. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении окончательное придание формы деталям машин нередко происходит с помощью технологий, основанных на поверхностном пластическом деформировании. Часто в качестве инструмента, оказывающего воздействие на заготовку (деталь), применяют шарик, ролик, алмазный индентор, которые выполняют локальное силовое воздействие на заготовку. Направление воздействия происходит под прямым углом, т.е. является ортогональным. Очень часто при обработке деталей машин поверхностному слою последних не уделяется должного внимания, особенно в случае, когда величина деформирующего обжатия сопоставима со значением шероховатости

заготовки. По ряду причин формоизменение шероховатости заготовок при их деформировании мало изучено. Установлено [1–3], что после токарной обработки шероховатость приобретает регулярный треугольный микропрофиль в поперечном следу обработки направлении. Известно [3–5], что обработанные до значения шероховатости поверхности $R_z = 10$ –80 изделия имеют регулярные выступы, позволяющие оказывать на них одновременное силовое воздействие со стороны инструмента, т.е. деформирующий инструмент может воздействовать на несколько микровыступов.

В данной работе будет решаться задача по формоизменению шероховатого слоя заготовки при силовом воздействии на нее, с

² alexxx43zet@mail.ru

ISSN 2500-1590 (online)

установлением геометрии формоизменения отдельных микровыступов. Величина осадки микропрофиля будет сравнима с его высотой.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет напряженно-деформированного состояния шероховатого слоя [6, 7] осуществлен посредством расчетной среды ANSYS Workbench [8].

Формоизменение микронеровностей осуществляли согласно схеме осадки шероховатой поверхности образца 3 жестким инструментом — индентором 1 (рис. 1). В данной работе программа ANSYS показывает вертикальное перемещение индентора и формоизменения микровыступов во времени.

Масштабный коэффициент микровыступов составлял 300. Высота микронеровностей h была 6 мм, длина одного микровыступа D - 20 мм, угол у основания $\alpha -$ 30 0 . Данные показатели микрорельефа являются фактическими (с учетом масштабного коэффициента) после лезвийной обработки. Образцы изготавливали из мягких металлов. На производстве запорной арматуры прокладки из мягких металлов используют для герметизации сосудов высокого давления [9–12].

Величина угла деформирующего инструмента β (см. рис. 1) составляла 0^0 – для имитации деформирующего шарика или ролика с радиусом, позволяющим деформировать 5 микронеровностей образца 3 [13–16].

Величина подложки (слоя под микронеровностями) Н (см. рис. 1) сравнима с высотой микронеровностей. Условия осадки микропрофиля – стесненные, так как взят фрагмент поверхностного слоя образца, а отсутствующая связь фрагмента с образцом заменена соответствующими граничными условиями, представленными ниже.

При осадке микропрофиля были следующие характеристики образца: тип — шероховатая пластина; диаграмма осадки материала — билинейная, остальные значения указаны в таблице.

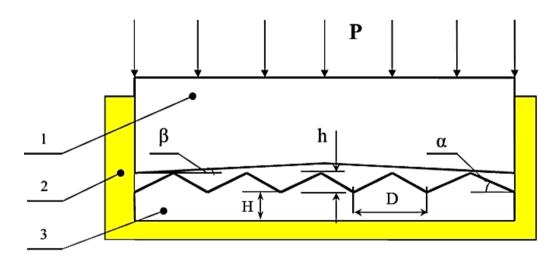


Рис. 1. Физическая модель нагружения микронеровностей жестким инструментом: 1 – индентор; 2 – корпус приспособления; 3 – образец Fig. 1. Physical model of exposing microroughnesses to the rigid tool impact: 1 – indentor; 2 – device body; 3 – sample

Характеристики образцов Sample characteristics

Материал	Модуль упругости, <i>E</i> , МПа	Коэффициент Пуас- сона, µ	Предел текучести, $\sigma_{\text{T}},\text{МПа}$	Модуль упрочнения, <i>Е</i> т, МПа
Свинец	17000	0,42	10	200
Олово	55000	0,33	12	785
Алюминий	69000	0,33	30	1150
Медь	120000	0,33	60	3000

Параметры индентора: тип — пластина; материал — инструментальная сталь ШХ15; модуль упругости $E=2.11\times10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu=0.3$; диаграмма осадки материала — билинейная, с пределом текучести $\sigma_{\rm T}=2000$ МПа модуль упрочнения $E_{\rm T}=20000$ МПа. Индентор принят жестким телом (рис. 2), имеющим 20 конечных элементов.

Условия выполнения осадки:

- 1) материал образцов и индентора упруго-пластический:
- 2) коэффициент трения на контакте образца и индентора составлял 0.2^3 ;
- 3) сетка на контактной поверхности образцов измельчена, см. рис. 2.

Граничные условия численного расчета приняты следующими (рис. 3):

1) движение по торцам образца ограни-

чивали по оси оХ (Displacement C,D);

- 2) движение по боковым плоскостям ограничивали у образцов по оси оZ (Displacement E.F):
- 3) нижнюю опорную поверхность образца фиксировали (Fixed Support A).
- 4) Выполняли осадку микровыступов (см. рис. 3), задавая вертикальное смещение индентору на 0,5h (Joint-Displacement B), т.к. известно [9, 18, 19], что при малых толщинах подложки при перемещении индентора на превосходящую 0,5h величину может произойти полное смятие микропрофиля. Это, во-первых, не даст возможности увидеть картину деформированного микропрофиля и, вовторых, приведет к фатальной ошибке при решении задачи [8].

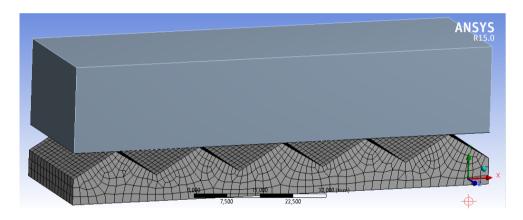
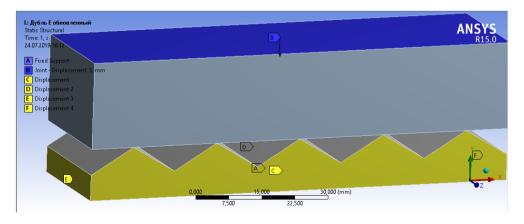


Рис. 2. Вид конечноэлементной сетки образца (число конечных элементов – 5576, узлов – 27445) Fig. 2. Sample finite-element grid (5,576 finite elements; 27,445 nodes)



Puc. 3. Способ задания граничных условий и нагрузки Fig. 3. Method for setting boundary conditions and load

.

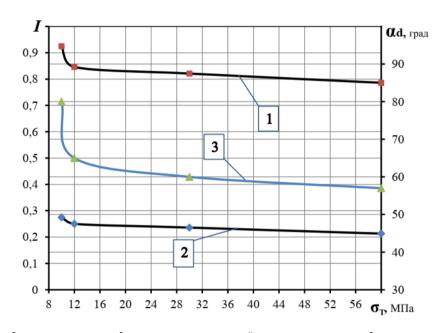
³ Крагельский И. В., Виноградова И. В. Коэффициенты трения: справ. пособ. М.: Изд-во «Машгиз», 1962. 220 с.

ISSN 2500-1590 (online)

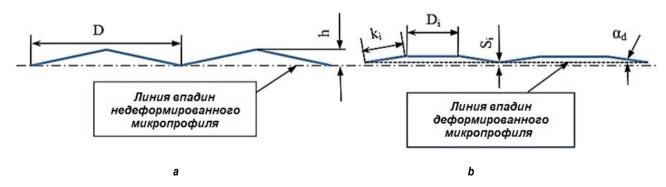
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние предела текучести модели микронеровностей на относительную длину сглаженного участка I_D , вертикальное смещение точки впадин микропрофиля I_h и изменение угла при основании деформированного микропрофиля α_d при осадке микропрофиля на 50% представлено на рис. 4, где $I_D = \frac{D_i}{D}$; $I_h = \frac{S_i}{h}$; $\cos \alpha_d = \frac{D/2 - D_i}{k_i}$; $\epsilon_h = 100\%$ при h = 6 мм. Вышеуказанные параметры представлены на рис. 1 и 5.

По наблюдениям (см. рис. 4), при максимальной осадке микропрофиля увеличение предела текучести модели микронеровностей с 10 до 60 МПа способствует снижению как угла у основания деформированного микропрофиля, так и относительной длины сглаженного участка и вертикального подъема точки впадин микропрофиля. Это свидетельствует о том, что чем прочнее микропрофиль, тем в большей степени он сохраняет свою исходную форму.



Puc. 4. Влияние предела текучести модели микронеровностей на относительную длину сглаженного участка I_D — 1; вертикальное смещение впадины I_h — 2; угол при основании микропрофиля α_d — 3 Fig. 4. Impact of the yield stress of the microroughness model on the relative length of the smoothed section I_D — 1; valley vertical displacement I_h — 2; microprofile base angle α_d — 3



Puc. 5. Схема формоизменения модели шероховатости: а — недеформированный профиль, b — профиль после i-го деформирования; D — длина единичного выступа микропрофиля; D_i — длина сглаженного участка микропрофиля после i-го деформирования; h — высота микропрофиля; S_i — величина подъема впадины после i-го деформирования; α_d — угол при основании деформированного микропрофиля

Fig. 5. Diagram of roughness model shape change: a — undeformed profile; b — profile after the ith strain;

D — length of the microprofile single asperity; D_i — length of the microprofile smoothed section after the ith strain;

h — microprofile height; S_i — valley elevation after the ith strain; α_d — deformed microprofile base angle

Корме того, необходимо отметить, что с увеличением предела текучести модели микронеровностей с 10 до 12 МПа (при переходе материала модели микронеровностей от свинца к олову) произошла значительная стабилизация формы микропрофиля, именно: относительная длина деформированного микропрофиля уменьшилась с 0,92 до 0,846 - на 8,5%; вертикальное перемещение точки впадин микропрофиля уменьшилось с 0,28 до 0,25 - на 9%; угол у основания деформированного микропрофиля уменьшился с 80 до 65^{0} – на 19%. Данное снижение формоизменения микропрофиля при деформировании можно объяснить значительным повышением его упругих свойств. Так, если у свинца модуль упругости составлял 17000 МПа, то у олова он составлял 55000 МПа. Кроме того, модуль упрочнения олова (785 МПа) почти в 4 раза превышает модуль упрочнения свинца (200 МПа), см. таблицу.

На рис. 6, по причине симметричности модели микронеровностей, показаны половины изополос деформированного микропрофиля, изготовленного из свинца (как более пластичного материала) и меди (как более прочного материала), представляющего картину деформированного состояния в экстремальных значениях. Изополосы показаны для вертикального (оY) и горизонтального (оX) направлений деформирования микронеровностей до 50%.

По результатам картин изополос виден механизм пластического формоизменения микровыступов: по горизонтали — от 0,9 мм — для меди и до 1,05 мм — для свинца, симметрично от пика микронеровности (см. рис. 6), а также смятие пика микропрофиля порядка 3 мм (0,5h). Из анализа изополос виден подъем впадин микропрофиля, при этом осталась незначительная площадь пустот. Глубина пустот составила около 1,4 мм — 23% от начальной высоты профиля у микропрофиля

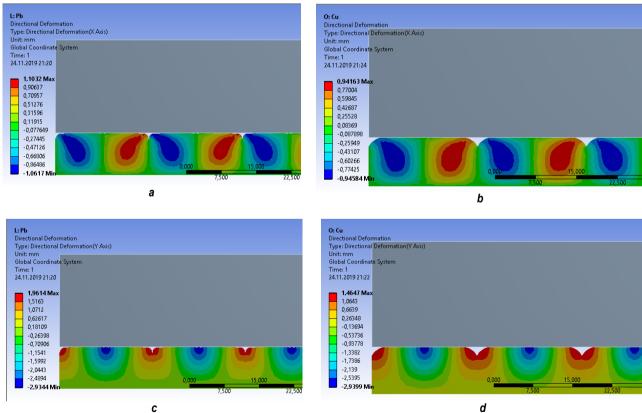


Рис. 6. Участки распределения пластических деформаций микропрофиля: направление оХ, ε_h = 50% (a – свинец, b – медь); направление оY, ε_h = 50% (c – свинец, d – медь) Fig. 6. Distribution areas of microprofile plastic deformations: oX direction, ε_h = 50% (a – lead, b – copper); oY direction, ε_h = 50% (c – lead, d – copper)

ISSN 2500-1590 (online)

из свинца, и 1,8 мм — 30% от начальной высоты профиля у микропрофиля из меди. В первом приближении, основываясь на величине глубины пустот и длине сглаженного участка микропрофиля при его деформировании на 50%, можно заключить (см. рис. 4, 6), что площадь пустот микропрофиля из ме-

ди превышает площадь пустот микропрофиля из свинца в 3,5–4 раза.

Степень упрочнения материала микропрофиля определяли по интенсивности напряжений, определяемой по формуле Губера—Мизеса [20]:

$$\sigma_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + (\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + (\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} + 6(\tau_{xy}^{2} + \tau_{yz}^{2} + \tau_{xz}^{2})}.$$
 (1)

На рис. 7 показано влияние степени осадки микронеровностей ϵ_h на интенсивность напряжений σ_i .

Изополосы интенсивности напряжений микронеровностей σ_i представлены на рис. 8 при деформировании на 25 и 50%, соответственно.

Как видно из графика (см. рис. 7), с возрастанием степени осадки микропрофиля увеличение интенсивности происходит напряжений, причем до величины осадки в 20% напряженное состояние (НС) под пиками возрастает сильнее, затем интенсивность возрастания падает. При деформировании микропрофиля свыше 40% интенсивность напряжений вновь возрастает в 1,1-1,2 раза. Увеличение НС под впадинами микронеровностей было практически линейным до величины осадки микропрофиля в 40-45%, затем градиент интенсивности возрастания увеличился.

На изополосах (см. рис. 8) видно, что с начала осадки напряженная область была на расстоянии порядка 0,1h (см. рис. 1) от зоны контакта с индентором. При деформации микропрофиля в 25% напряженная зона под пиками микропрофиля начинает распространяться в горизонтальном направлении. Достигнув 40% осадки, напряженная зона под пиками микропрофиля возросла в плоскости ХОҮ, при этом произошло формирование напряженной области и во впадинах микропрофиля. Достигнув 50% величины осадки, напряженные зоны, сформированные под пиками микронеровностей, касаются впадин. В результате этого картина НС во впадинах изменилась следующим образом: для микропрофиля из свинца НС превысило на 20% НС под пиками микропрофиля, у микропрофиля из олова и алюминия НС под пиками и во впадинах было примерно одинаковым, а для микропрофиля из меди НС под пиками превышало НС во впадинах на 20% (см. рис. 7, 8), что может быть обусловлено меньшей пластической текучестью и максимальным модулем упрочнения более прочного микропрофиля [1].

Установлено, что при стесненном деформировании НС микропрофиля, в зависимости от расстояния до контактной поверхности с индентором, превысило в 4–8 раз предел прочности материала микронеровностей.

В работах [13, 14] для стесненных условий деформирования установлено, что возрастание величины упрочнения материала микронеровностей прямо пропорционально зависит от величины деформирования и может превышать предел прочности материала в 4–5 раз, что согласуется с результатами данной работы.

Необходимо указать, что численный расчет подтверждает экспериментальные значения по изготовленным из свинца микронеровностям [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Подъем микровпадины, в зависимости от материала, начинается при 10–20% осадке микровыступов и доходит до 0,21–0,28 от его начальной высоты.
- 2. Относительная длина сглаженного участка микронеровностей составила 0,78—0,92 от первоначальной его длины, в зависимости от материала микронеровностей.

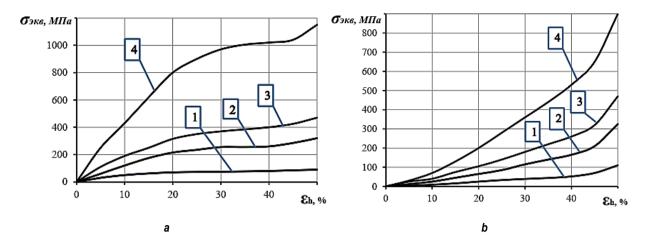
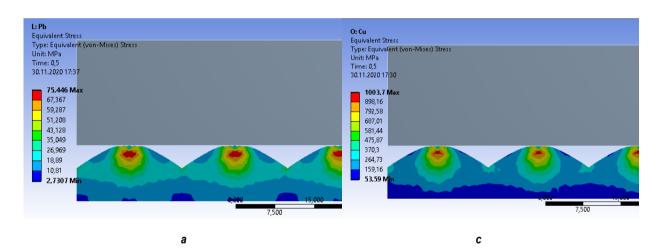


Рис. 7. Влияние степени деформирования микропрофиля на максимальную интенсивность напряжений (1 – свинец; 2 – олово; 3 – алюминий; 4 – медь): а – под вершиной микропрофиля; b – под впадиной микропрофиля

Fig. 7. Influence of the microprofile deformation degree on the maximum stress intensity (1 – lead; 2 – tin; 3 – aluminum; 4 – copper): a – under the microprofile top; b – under the microprofile valley



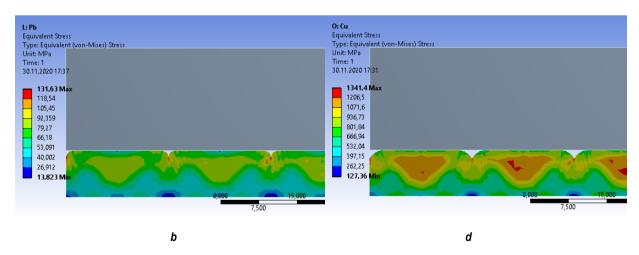


Рис. 8. Участки распределения интенсивности напряжений микропрофиля σ_i : $\varepsilon_h = 25\%$ (а – свинец, с – медь); $\varepsilon_h = 50\%$ (b – свинец, d – медь) Fig. 8. Distribution areas of microprofile stress intensity σ_i : $\varepsilon_h = 25\%$ (a – lead, c – copper); $\varepsilon_h = 50\%$ (b – lead, d – copper)

ISSN 2500-1590 (online)

- 3. Угол у основания деформированных микронеровностей составил 57^0 для моделей из меди и 80^0 для моделей из свинца.
- 4. Глубина пустот микронеровностей составила 1,4 мм 23% от начальной высоты профиля для моделей из свинца и 1,8 мм 30% от начальной высоты профиля для моделей из меди.
- 5. При осадке микропрофиля в 50% повышение предела текучести модели микровыступов с 10 до 60 МПа способствует снижению как угла при основании деформированного микропрофиля, так и относительной длины и вертикального подъема точки впадин микропрофиля. Также наблюдалось уменьшение площади пустот микропрофиля в 3,5–4 раза.
- 6. Установлено, что НС микровыступов при осадке на 50% превзошло предел его прочности в 4–8 раз, причем НС во впадинах изменялось: возрастало на 20% относительно вершин микронеровностей для наиме-

- нее прочного материала микропрофиля, а также снижалось на 20% относительно вершин микронеровностей для наиболее прочного.
- 7. Численный расчет показал, что при величине осадки микропрофиля на 50% полного выглаживания микровыступов не состоялось. Таким образом, теоретически, при назначении режимов отделочноупрочняющей обработки при обжатии на 50% от исходного значения шероховатости на микропрофиле будут оставаться микропустоты, которые впоследствии могут играть роль «масляных карманов» при работе пар трения. Также решение данной задачи может быть применено при проектировании запирающих элементов затворного узла трубопроводной арматуры и регулировке усилия запирания затворного узла относительно начальной шероховатости контактных поверхностей.

Список источников

- 1. Проскуряков Ю. Г. технология упрочняюще-калибрующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971. 207 с.
- 2. El-Tahawy M., Pereira P. H. R., Huang Yi, Park H., Choe Heeman, Langdon T. G., et al. Exceptionally high strength and good ductility in an ultrafine-grained 316L steel processed by severe plastic deformation and subsequent annealing // Materials Letters. 2018. Vol. 214. P. 240–242. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.040.
- 3. Никитин Г. С., Галкин М. П., Жихарев П. Ю. Влияние внеконтактных зон на усилия деформирования в процессах обработки металлов давлением // Металлург. 2012. № 10. С. 61–65.
- https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18528138.
- 4. Демкин Н. Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Изд-во «Наука», 1970. 227 с.
- 5. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Изд-во «Машиностроение», 1972. 240 с.
- 6. Вулых Н. В. Анализ напряженного состояния шероховатого слоя при локальном и осесимметричном пластическом деформировании // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017;21(11):17–26. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-17-26.
- 7. Нго Као Кыонг, Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка качества упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании роликами разных конструкций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 30–37.

- https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37.
- 8. Chen Xiaolin, Liu Yiijun. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench: «CRC Press», 2014. 411 p.
- 9. Огар П. М., Тарасов В. А., Межецкий В. И. Герметичность затворов арматуры и сосудов высокого давления // Проблемы механики современных машин: матер. V Междунар. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2012 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. С. 24–27. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381319.
- 10. Nikolaeva E. P., Mashukov A. N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53. Iss. 7-8. P. 459–463. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1.
- 11. Serebrennikova A. G., Nikolaeva E. P, Savilov A. V., Timofeev S. A., Pyatykh A. S. Research results of stress-strain state of cutting tool when aviation materials turning // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. No. 1. P. 012104. https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104.
- 12. Gridin G. D. New in development of high-pressure angle shutoff valves // Chemical and Petroleum Engineering. 2012. Vol. 47. No. 9-10. P. 683–686.
- 13. Vulykh N. V., Vulykh A. N. Computer Simulation of Microprofile Strain Under Orthogonal Impact at Constrained Load. Part 1 // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9 103.

- 14. Vulykh N. V. Centrifugal Rolling of Flexible Shafts for Achieving Best Possible Roughness of the Surface // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1 115.
- 15. Zaides S. A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface deformation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation // Steel in Translation. 2020. Vol. 50. P. 745–749. https://doi.org/10.3103/S0967091220110145.
- 16. Zaides S. A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening // Russian Metallurgy (Metally). 2019. Vol. 2019. No. 13. P. 1487–1491. https://doi.org/10.1134/S003602951913041X. 17. Кузьменко А. Г. Глобальный и локальный коэффициенты трения и объяснение их зависимости от давления // Проблемы трибологии. 2008. № 2. С. 69–88.

- https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19119568.
- 18. Вулых Н. В., Рыжиков И. Н., Пэй Цаоцао, Сайганов Т. М. Определение критического перемещения штампа при деформировании идеально жесткопластического микропрофиля при стесненных условиях нагружения // Жизненный цикл конструкционных материалов: матер. IX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Издво ИрНИТУ, 2019. С. 154–158.
- 19. Vulykh N. V. Microprofile model form changing research at axisymmetric deformation with account of scale factor // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_121.
- 20. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Изд-во «Высшая школа», 1970. 288 с.

References

- 1. Proskuryakov Y. G. *Technology of hardening and gaging treatment of metals*. Moscow: Mashinostroenie; 1971, 207 p. (In Russ.).
- 2. El-Tahawy M., Pereira P. H. R., Huang Yi, Park H., Choe Heeman, Langdon T. G., et al. Exceptionally high strength and good ductility in an ultrafine-grained 316L steel processed by severe plastic deformation and subsequent annealing. *Materials Letters*. 2018;214:240-242. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.040.
- 3. Nikitin G. S., Galkin M. P., Zhikharev P. Yu. Effect of out-of-contact zones on deforming forces at metal forming processes. *Metallurg.* 2012;10:61-65. (In Russ.).
- 4. Demkin N. B. *Rough surface contacting*. Moscow: Nauka; 1970, 227 p. (In Russ.).
- 5. Schneider Y. G. Formation of regular microreliefs on parts and their operation properties. Leningrad: Mashinostroenie; 1972, 240 p. (In Russ.).
- 6. Vulykh N. V. Analysis of rough layer stressed state at local and axisymmetric plastic deformation. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(11):17-26. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-17-26.
- 7. Ngo Cao Cuong, Zaides S. A., Le Hong Quang. Hardened layer quality evaluation at surface plastic deformation by rollers of different designs. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2018;22(1):30-37. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37.
- 8. Chen Xiaolin, Liu Yiijun. Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench: CRC Press; 2014, 411 p.
- 9. Ogar P. M., Tarasov V. A., Mezheckij V. I. Impermeability of set valves and high pressure vessels. In: Problemy mekhaniki sovremennyh mashin: materialy V Mezhdunarodnoj konferencii = Problems of

- modern machinery mechanics: materials of the 5th International conference. 25–30 June 2012, Ulan-Ude. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management; 2012, p. 24-27. (In Russ.). https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381319.
- 10. Nikolaeva E. P., Mashukov A. N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017;53(7-8):459-463. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1.
- 11. Serebrennikova A. G., Nikolaeva E. P., Savilov A. V., Timofeev S. A., Pyatykh A. S. Research results of stress-strain state of cutting tool when aviation materials turning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944(1):012104. https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104.
- 12. Gridin G. D. New in development of high-pressure angle shutoff valves. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2012;47(9-10):683-686.
- 13. Vulykh N. V., Vulykh A. N. Computer simulation of microprofile strain under orthogonal impact at constrained load. Part 1. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds.). Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer; 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9 103.
- 14. Vulykh N. V. Centrifugal rolling of flexible shafts for achieving best possible roughness of the surface. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1 115.
- 15. Zaides S.A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface de-formation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital sur-face deformation. *Steel in Translation*. 2020;50:745-749.

ISSN 2500-1590 (online)

https://doi.org/10.3103/S0967091220110145.

16. Zaides S. A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;2019(13):1487-1491. https://doi.org/10.1134/S003602951913041X.

17. Kuzmenko A. G. Global and local coefficients of friction and explanation of their dependence on pressure. *Problemy tribologii = Problems of tribology*. 2008;2:69-88. (In Russ.).

18. Vulykh N. V., Ryzhikov I. N., Pei Caocao, Saiganov T. M. Determination of die critical displacement under deformation of a microprofile ideally rigid-plastic under constrained loading conditions. In: Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov: materialy IX Vserosssijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вулых Николай Валерьевич,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вулых Александр Николаевич,

студент,

Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, 664038, Иркутская область, Иркутский р-н, п. Молодежный, 1/1, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 08.10.2021; принята к публикации 27.10.2021.

uchastiem = The Lifecycle of Structural Materials: proceedings of the 9th All-Russian scientific and technical conference with international participation. 24–26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, p. 154-158. (In Russ.).

19. Vulykh N. V. Microprofile model form changing research at axisymmetric deformation with account of scale factor. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018). Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Cham: Springer; 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_121.

20. Samul V. I. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. Moscow: Vysshaya shkola; 1970, 288 p. (In Russ.).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay V. Vulykh,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Alexander N. Vulykh,

Student.

Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky,

1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region, Irkutsk district, 664038, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 08.10.2021; accepted for publication 27.10.2021.