

УДК 621.778.13

Численное моделирование формоизменения микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного деформирования. Часть 2

© Н.В. Вулых¹, А.Н. Вулых²¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация²Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрены процессы локального поверхностного пластического деформирования деталей машин. Установлено, что реальная поверхность деталей машин после лезвийной обработки имеет преимущественно клинообразный (треугольный) профиль в продольном направлении. Показано, что механизм формоизменения микропрофиля, в силу его нерегулярного характера и др., исследован недостаточно. Установлен механизм формоизменения модели микронеровностей при степенях деформирования, сопоставимых с высотой исходного микропрофиля. Представлено влияние степени осадки микропрофиля на напряженное состояние деформированного микропрофиля при стесненных условиях нагружения.

Ключевые слова: микропрофиль поверхностей, моделирование шероховатости, конечно-элементное моделирование, упруго-пластическая деформация, напряженное состояние, стесненное деформирование

Numerical Modelling of the Microprofile Forming in Orthogonal Impact under Constrained Deformation. Part 2

© Nikolay V. Vulykh¹, Alexander N. Vulykh²¹Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation²Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,
Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article discusses the processes of local surface plastic deformation of machine parts. It has been established that the real surface of machine parts after blade processing has a predominantly wedge-shaped (triangular) profile in the longitudinal direction. The article shows that the mechanism of microprofile shaping, due to its irregular nature, etc., is insufficiently studied. The mechanism of shaping the model of microroughnesses at degrees of deformation comparable to the height of the original microprofile has been established. The article presents the influence of the degree of precipitation of the microprofile on the stress state of the deformed microprofile under cramped loading conditions.

Keywords: microprofile of surfaces, roughness modeling, finite-element modelling, elastic-plastic deformation, stress state, constrained deformation

Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) традиционно осуществляется локальным деформирующим инструментом (шариком, роликом, диском, алмазным индентором и др.), при этом силовое воздействие инструмента на деталь, как правило, происходит по нормали к последней, то есть при ортогональном воздействии. Пластическое локальное воздействие позволяет выполнять отделочно-упрочняющую обработку разнообразных деталей сложных и простых форм. Исследование деформирования шероховатости на реальных изделиях является затруднительным в силу неоднородности поверхности, случайного распределения микровыступов по высоте и др.

В первой части работы [1] установлено, что реальная поверхность деталей

машин после лезвийной обработки имеет преимущественно клинообразный (треугольный) профиль в продольном направлении. Определён механизм формоизменения модели микронеровностей при степенях деформирования, сопоставимых с высотой исходного микропрофиля. Одной из проблем в области деформирующей обработки ППД является недостаточное исследование механизма формоизменения микропрофиля из-за его нерегулярного характера и др. Вследствие чего актуальной является задача дальнейшего совершенствования технологии ППД, заключающаяся в учете технологической наследственности при образовании микрогеометрии поверхности.

Первая часть работы [1] посвящена изучению механизма формоизменения микропрофиля. Во второй части продол-

жено исследование формоизменения микропрофиля. **Целью данной работы** является определение напряженного состояния модели микронеровностей при степенях деформирования, сопоставимых с высотой исходного микропрофиля.

Материал и методы исследования

Напряженно-деформированное состояние модели микронеровностей рассмотрено с помощью применяемой для компьютерного моделирования физических процессов программы ANSYS Workbench [2], в основе которой лежит метод конечных элементов.

Формирование геометрии расчетной области в программе последовательно проводили согласно схеме нагружения шероховатой поверхности образца 3 жестким инструментом – индентором 1 (рис. 1). Деформирующая обработка в программе ANSYS представляет собой реальное вертикальное перемещение индентора и сложное формоизменение микропрофиля во времени.

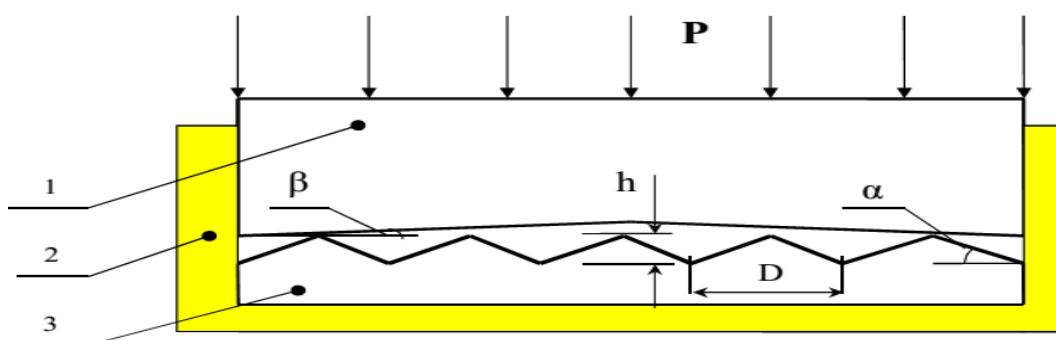


Рис. 1. Физическая модель нагружения микронеровностей жестким инструментом: 1 – индентор, 2 – корпус приспособления, 3 – образец

Параметры физической (рис. 1) и численной модели микропрофиля (рис. 2), способ задания граничных условий, моделирующий стесненные условия нагружения модели микропрофиля, а также

методика проведения исследований представлены в работе [1]. Численное моделирование выполнялось на величину осадки микропрофиля, не превышающую 0,5 от его исходной высоты¹ [3–6].

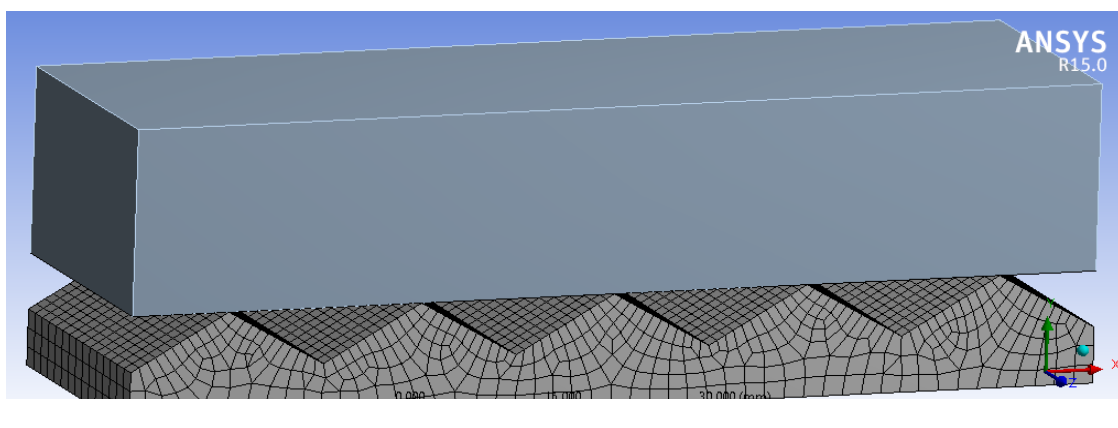


Рис. 2. Вид конечноэлементной сетки образца

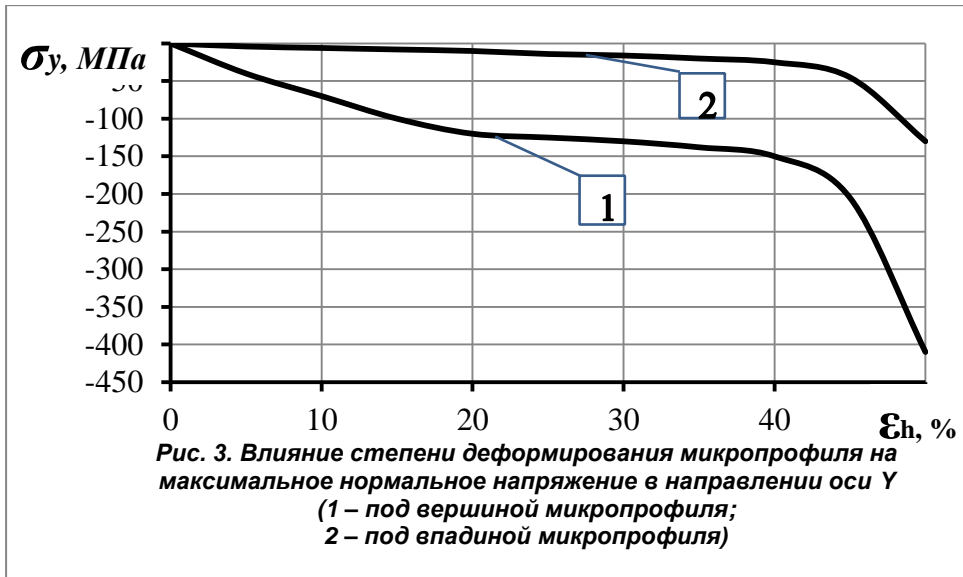
¹ Грдин Г.Д. Технологическое обеспечение герметичности разъемных соединений сосудов высокого давления при применении мягких покрытий: дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1980. 204 с.

² Вулых Н.В. Формирование микрогеометрии упрочненного слоя деталей при локальном и охватывающем поверхностном пластическом деформировании: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Иркутск, 2002. 182 с.

Результаты моделирования

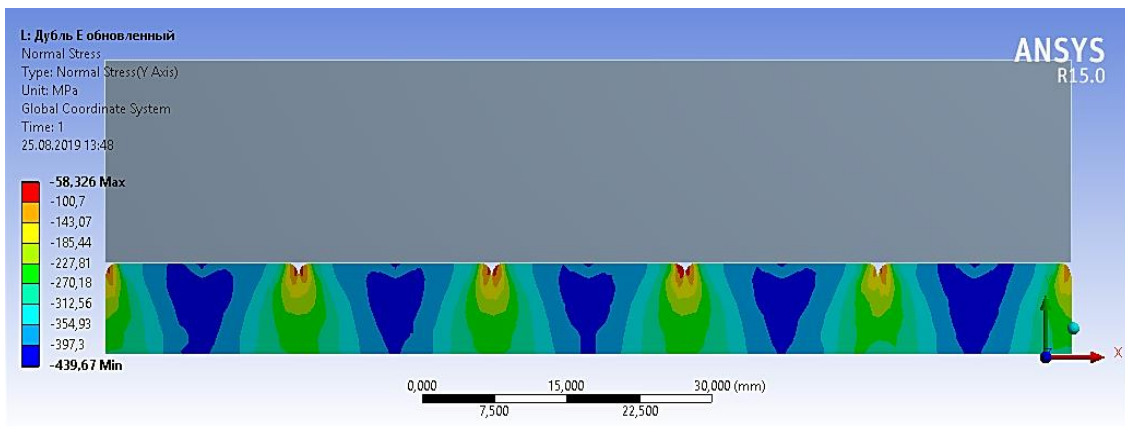
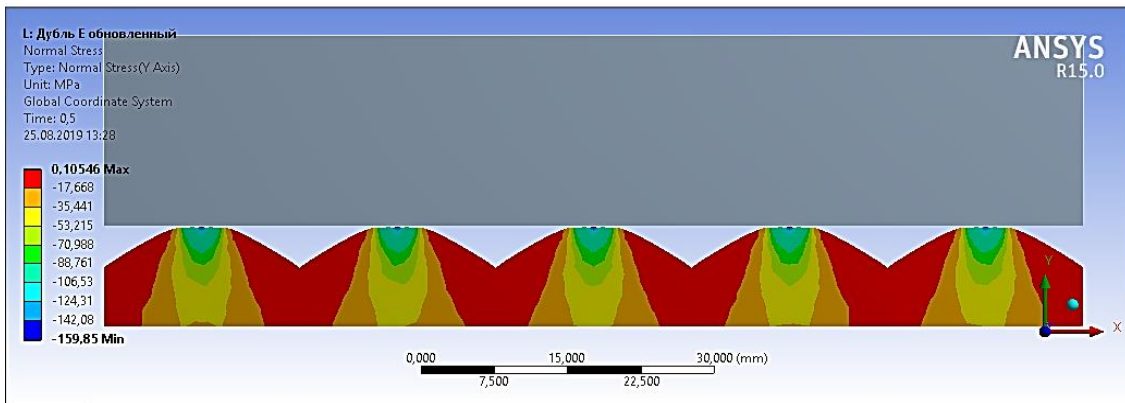
На рис. 3 представлено влияние степени деформирования микропрофиля

ϵ_h на нормальное напряжение σ_y , совпадающее с направлением воздействия индентора на микропрофиль.



Картина изополос нормального напряжения микропрофиля σ_y представ-

лена на рис. 4 и 5 при деформировании на 25 и 50 % соответственно.



Как видно из графика (рис. 3), на начальном этапе деформирования микропрофиля до 20 % напряженное состояние (НС) сжимающих напряжений в контактной области микропрофиля с индентором превышало НС во впадинах в 10–12 раз. С увеличением степени деформирования до 25–40 % разница в НС снизилась до 6–9 раз, при дальнейшем деформировании НС резко возросло как под пиками, так и во впадинах микропрофиля. В свою очередь градиент НС снизился до 3–4,5 раз.

Анализ изополос (рис. 4, 5) показывает, что при деформировании микропрофиля на 20 % напряженная зона достигла его основания.

При деформировании в 40 % упрочненная зона сместилась от контактной поверхности с индентором в тело микропрофиля, поля НС достигли впадин микропрофиля. На конечном этапе деформирования ($\epsilon_h = 50\%$) зона максимальных напряжений достигла основания микропрофиля.

На рис. 6 представлено влияние степени деформирования микропрофиля ϵ_h на касательные напряжения τ_{xy} , лежащие в плоскости основного формоизменения микропрофиля.

Картина изополос касательных напряжений микропрофиля τ_{xy} показана на рис. 7 и 8 при деформировании на 25 и 50 % соответственно.

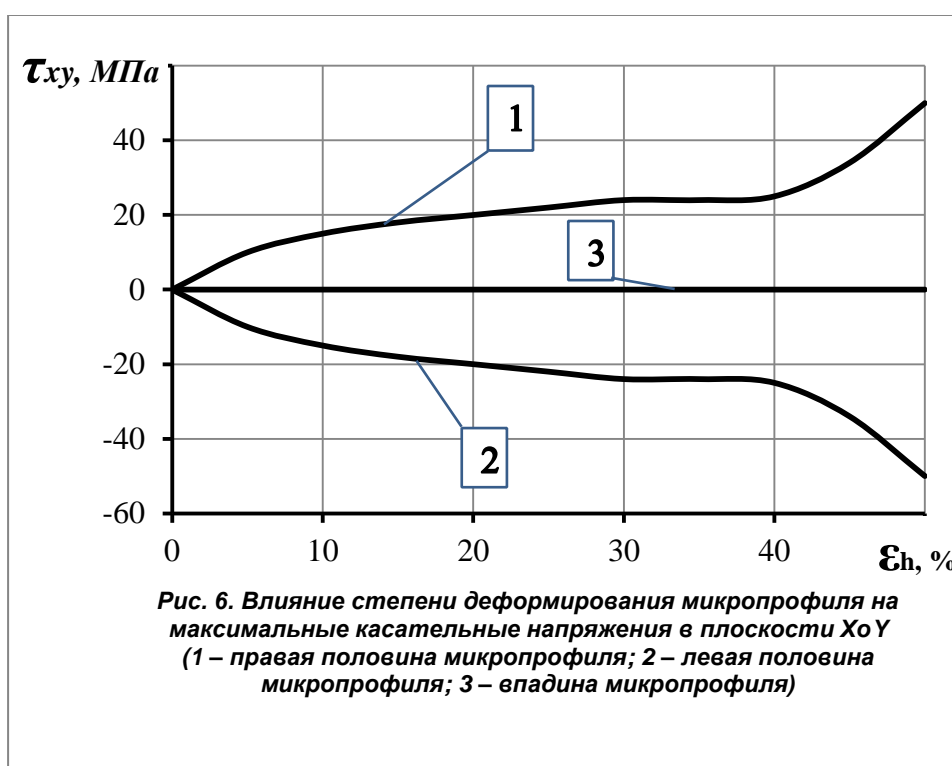


Рис. 6. Влияние степени деформирования микропрофиля на максимальные касательные напряжения в плоскости XoY (1 – правая половина микропрофиля; 2 – левая половина микропрофиля; 3 – впадина микропрофиля)

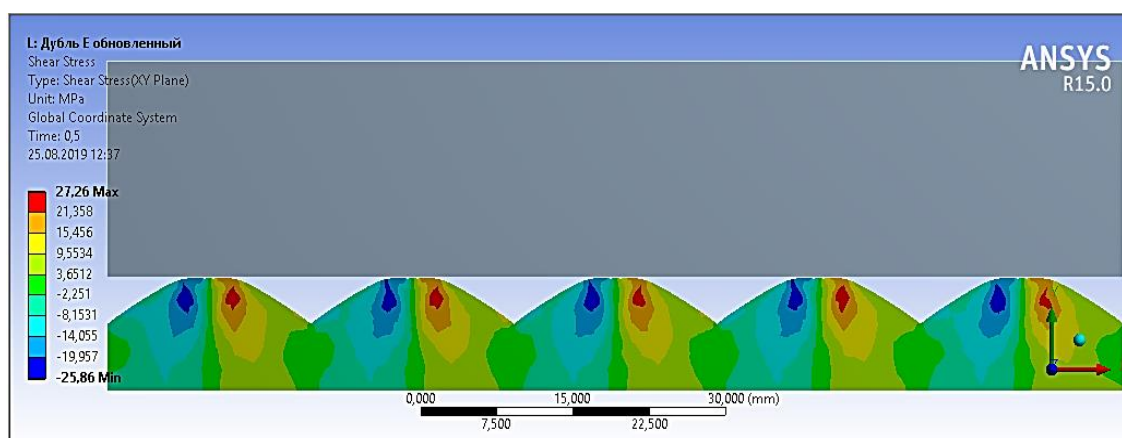


Рис. 7. Поля распределения касательных напряжений микропрофиля τ_{xy} ($\epsilon_h = 25\%$)

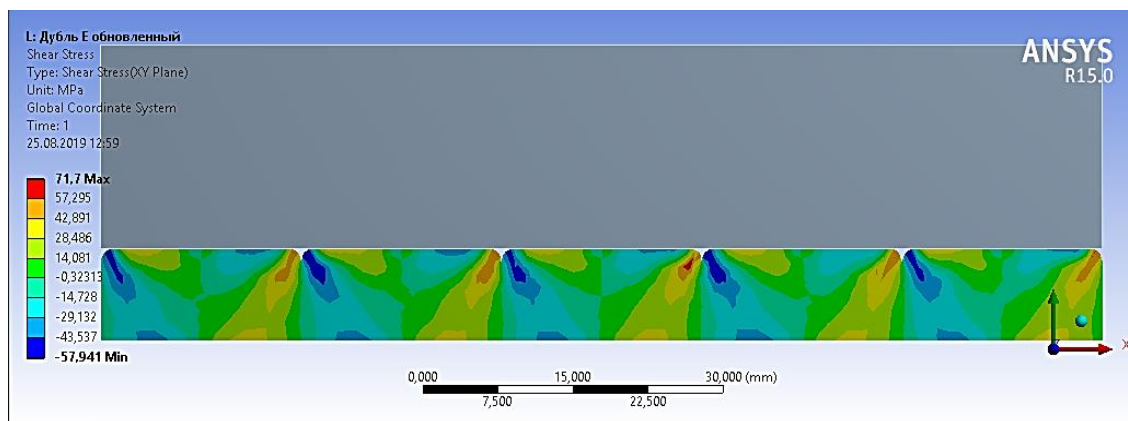


Рис. 8. Поля распределения касательных напряжений микропрофиля τ_{xy} ($\epsilon_h = 50\%$)

Как видно из графика (рис. 6), с увеличением степени осадки микропрофиля касательные напряжения в боковых частях микропрофиля симметрично возрастают. Однако при осадке микропрофиля в 30–40 % НС не изменялось, а при осадке микропрофиля с 40 до 50 % НС резко возросло, что может являться следствием увеличения степени осложнения деформирования микропрофиля.

Анализ изополос (рис. 7, 8) показывает, что при деформировании микропрофиля на 20 % напряженная зона от контактной поверхности с индентором начала

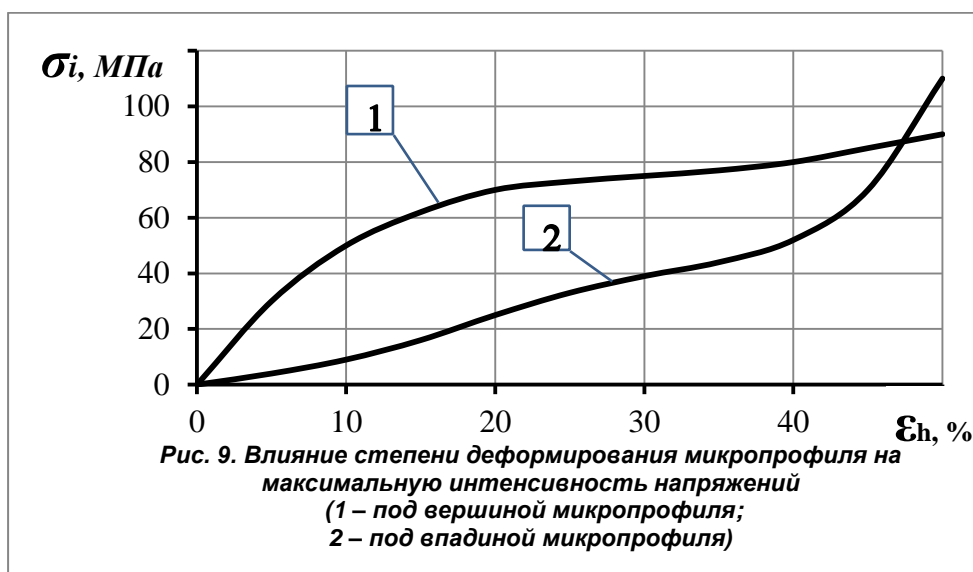
распространяться вглубь микропрофиля. При осадке микропрофиля на 30 % и более напряженная зона сместилась вниз от контактной поверхности в тело микропрофиля, а также распространилась в горизонтальном направлении симметрично вершин микропрофиля. На протяжении всего периода деформирования микропрофиля его НС в области вершин и впадин имело нулевое значение (рис. 6–8).

Оценить степень упрочнения материала микропрофиля можно по величине интенсивности напряжений, рассчитанной по формуле Губера-Мизеса [7]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}; (1).$$

На рис. 9 представлено влияние степени деформирования микропрофиля ϵ_h на интенсивность напряжений σ_i .

Картина изополос интенсивности напряжений микропрофиля σ_i представлена на рис. 10 и 11 при деформировании на 25 и 50 % соответственно.



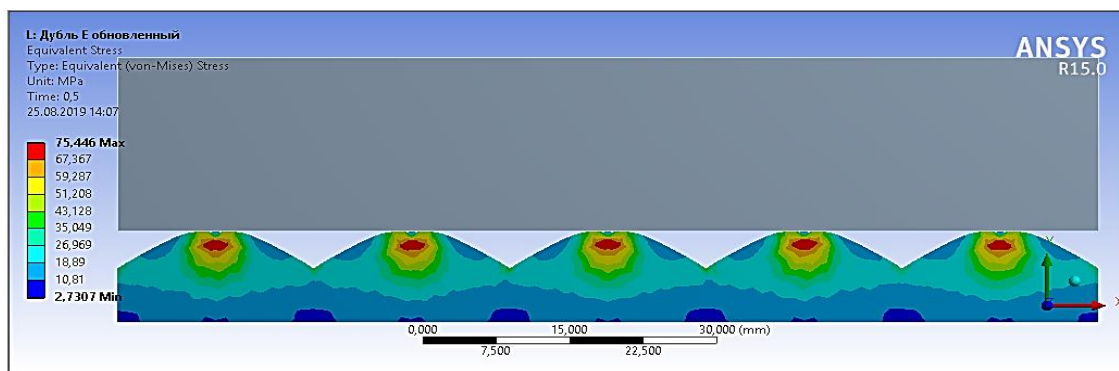


Рис. 10. Поля распределения интенсивности напряжений микропрофиля σ_i ($\epsilon_h = 25\%$)

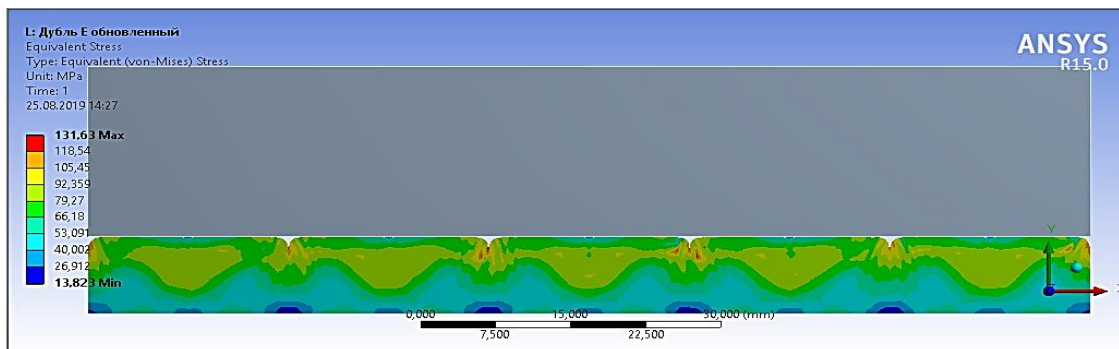


Рис. 11. Поля распределения интенсивности напряжений микропрофиля σ_i ($\epsilon_h = 50\%$)

Как видно из графика (рис. 9), с увеличением степени осадки микропрофиля интенсивность напряжений возрастает, причем до степени осадки микропрофиля в 20 % НС под пиками возрастает значительно, затем интенсивность возрастания снижается. Возрастание НС во впадинах микропрофиля происходило почти линейно до степени деформирования микропрофиля в 40 %, затем интенсивность возрастания увеличилась.

Анализ изополос (рис. 10, 11) показывает, что с начального момента деформирования напряженная зона находилась на расстоянии около 0,1 h (рис. 1) от контактной поверхности с индентором. При осадке микропрофиля в 25 % напряженная зона под пиками микропрофиля начинает распространяться в горизонтальном направлении. При достижении 30 % осадки микропрофиля НС формируется в его впадинах. При достижении 40 % осадки микропрофиля напряженная зона под пиками микропрофиля значительно увеличивается в плоскости XOY с одновременным формированием напряженной зоны во впадинах микропрофиля. При достижении 50 % степени осадки поля напряженных зон, сформированных под пиками микропрофиля, переходят своими границами под впадины, вследствие чего у последних

возрастает НС приблизительно на 20 % относительно пиков микропрофиля (рис. 9, 11).

Необходимо отметить, что в условиях стесненного деформирования НС микропрофиля превысило в 4–7 раз (в зависимости от расстояния до контактной поверхности с индентором) предел прочности материала микропрофиля.

В работах³ [8–10] исследовано деформирование в стесненных условиях, при этом показано⁴ [8], что увеличение степени упрочнения материала напрямую зависит от степени деформирования и может достигать 4 и 5-кратного значения от предела прочности материала.

Заключение. Решена объемная упруго-пластическая задача по глубокой осадке шероховатой поверхности, смоделированной клиньями на подложке. Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния объемного микропрофиля в плоскости XOY при его осадке на 50 % от первоначальной высоты в программе Ansys Workbench позволяет сделать следующие выводы:

³ Гридин Г.Д. Технологическое обеспечение герметичности разъемных соединений сосудов высокого давления при применении мягких покрытий: дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1980. 204 с.
⁴ Там же.

1. представлен характер изменения компонентов нормального σ_y и касательного τ_{xy} напряжений микропрофиля при его деформировании. Установлено, что при осадке микропрофиля более 40 % НС резко возрастает;

2. представлен характер изменения интенсивности напряжений σ_i микропрофиля при его деформировании. Установлено, что НС микропрофиля при

осадке на 50 % превысило предел его прочности в 4–7 раз, причем НС во впадинах возросло на 20 % относительно пиков микропрофиля;

3. следует отметить, что результаты численного расчета напряженно-деформированного состояния микропрофиля согласуются с экспериментальными данными [9].

Библиографический список

1. Вулых Н.В., Лэ Хонг Куанг, Вулых А.Н. Численное моделирование формоизменения микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного деформирования. Часть 1 // Молодежный вестник ИРГТУ. 2019. Т. 9. № 4. С. 19–26. [Электронный ресурс]. URL: <http://mvestnik.istu.irk.ru/journals/2019/04/articles/03> (20.01.2020).

2. Chen Xiaolin, Liu Yijun. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. CRC Press, 2014. 411 p.

3. Лившиц О.П., Гридин Г.Д. Влияние микрорельефа уплотнительных поверхностей на герметичность затворов сосудов высокого давления // Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами деталей машин: сб. тез. докл. конф. Киев, 1980. С. 81–83.

4. Вулых Н.В., Рыжиков И.Н., Пэй Цаоцао, Сайганов Т.М. Определение критического перемещения штампа при деформировании идеально жестко-пластического микропрофиля при стесненных условиях нагружения // Жизненный цикл конструкционных материалов: материалы IX Всерос.

науч.-техн. конф. с международным участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. С. 154–158.

5. Vulykh N.V. Microprofile model form changing research at axisymmetric deformation with account of scale factor // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. P. 1161–1168.

6. Вулых Н.В. Анализ напряженного состояния шероховатого слоя при локальном и осесимметричном пластическом деформировании // Вестник ИРГТУ. 2017. Т. 21. № 11. С. 17–26.

7. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1970. 288 с.

8. Зайдес С.А., Нго Као Кьонг. Интенсификация напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при стесненных условиях нагружения // Вестник ИРГТУ. 2015. № 7 (102). С. 55–59.

9. Унксов Е.П. Пластическая деформация при ковке и штамповке. М.: Машгиз, 1939. 192 с.

10. Зайдес С.А., Вулых Н.В. Охватывающее упрочнение маложестких валов. Теория, технология: монография. Saarbruecken: LAP LAMBERT Academic Publishing (Germany), 2013. 223 с.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Вулых Николай Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, Институт авиационного машиностроения и транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация, e-mail: vulix2011@yandex.ru

Nikolay V. Vulykh, Cand. Sci. (Technics), Associate Professor, Department of Engineering Technologies and Materials, Institute of Aircraft Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: vulix2011@yandex.ru

Вулых Александр Николаевич, студент группы 1-35.03.06 (ЭСХ) направления «Агроинженерия», Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 664038, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный, Российская Федерация, e-mail: vulix2011return@gmail.com

Alexander N. Vulykh, Student, Agroengineering, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny Village, Irkutsk district, Irkutsk region, 664038, Russian Federation, e-mail: vulix2011return@gmail.com