

УДК 621.778.13

Численное моделирование формоизменения микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного деформирования. Часть 1

© Н.В. Вулых¹, Лэ Хонг Куанг¹, А.Н. Вулых²¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация²Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация

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 угол при основании деформированного микропрофиля, на относительную ширину контактной поверхности, а также на поведение точки впадины микропрофиля при стесненных условиях нагружения.

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

Numerical Modelling of Microprofile Form-Changes in Orthogonal Impact in Conditions of Limited Deformation. Part 1

© Nikolay V. Vulykh¹, Le Hong Quang¹, Alexander N. Vulykh²¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation²Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk, Russian Federation

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. It is shown that the microprofile forming mechanism, due to its irregular nature and others, has not been sufficiently studied. The mechanism of shaping the model of micro-roughness at the degrees of deformation comparable with the height of the initial microprofile is established. The article presents the effect of the degree of microprofile precipitation on the angle at the basis of the deformed microprofile, on the relative width of the contact surface, as well as on the behaviour of the point of the microprofile trough under cramped loading conditions.

Keywords: surface microprofile, roughness modeling, finite-element modeling, elastic-plastic deformation, finite-element modeling, limited 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.

Реальная поверхность деталей никогда не бывает абсолютно гладкой, а всегда имеет микронеровности, образующие её микрорельеф. Характер микрорельефа – размеры, форма, взаиморасположение микронеровностей – определяется способом и условиями обработки поверхности. Неучёт исходной шероховатости не позволяет оценить влияние параметров технологического процесса на качество поверхности готовых изделий. Особенно остро это проявляется в процессах поверхностно пластического деформирования, когда величина натяга (обжатия) соизмерима с высотой микронеровностей. В этом случае происхо-

дит упрочнение не основного объема металла изделия, а лишь геометрических элементов поверхностного слоя.

Исследование деформирования шероховатости на реальных изделиях является затруднительным в силу неоднородности поверхности случайного распределения микровыступов по высоте и др. Как известно [1, 2], после лезвийной обработки тел вращения микронеровности имеют преимущественно клинообразный профиль. Следует отметить, что у поверхностей, обработанных точением с шероховатостью $R_a = 2,5 - 20$ мкм, высока вероятность того, что все выступы профиля одновременно могут вступать в контакт с плоским контртелом [3]. В работе [4] отмечается высокая однородность микропрофиля после точения. Таким образом, для моделирования поверхностного слоя, полученного лезвийным способом, вполне может быть пригоден регулярный профиль клинообразного (треугольного) сечения в продольном направлении.

Одной из проблем в области деформирующей обработки ППД является недостаточное исследование механизма формоизменения микропрофиля в силу его нерегулярного характера и др. Вследствие чего актуальной становится задача дальнейшего совершенствования технологии ППД, заключающаяся в учёте технологической наследственности при образовании микрогеометрии поверхности.

Задачей работы является установление механизма формоизменения модели микронеровностей при степенях деформирования, сопоставимых с высотой исходного микропрофиля.

Материал и методы исследования

Для анализа напряженно-деформированного состояния модели микронеровностей успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко используемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS Workbench [5, 6].

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.

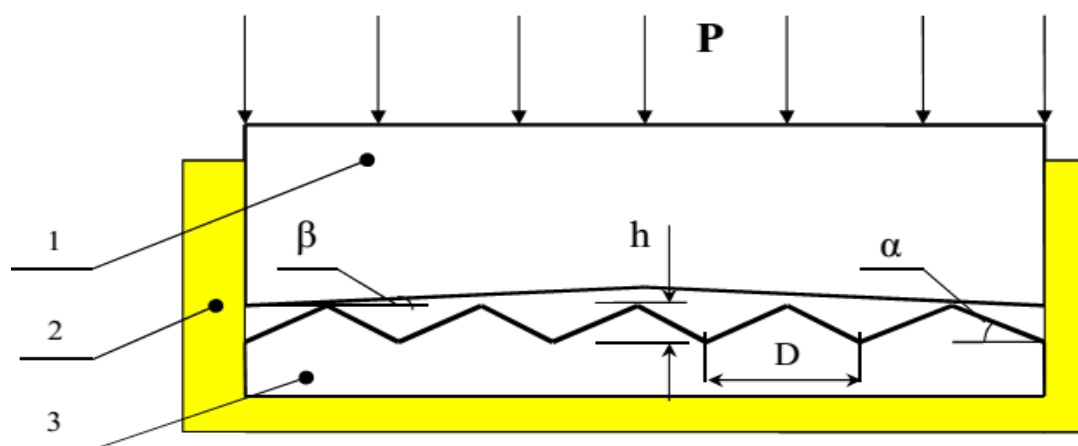


Рис. 1. Физическая модель нагружения микронеровностей жестким инструментом:

1 – индентор, 2 – корпус приспособления, 3 – образец

С целью наиболее наглядного формоизменения микропрофиля принят масштабный коэффициент 300. Высота микропрофиля h составляла 6 мм, длина D – 20 мм, угол при основании $\alpha - 30^\circ$ – данные показатели микрорельефа являются фактическими (с учётом масштабного коэффициента) после токарной обработки. В качестве материала образца использовали мягкий металл, формоизменяющийся в процессе деформирования в большей степени, чем металл средней твердости. Кроме того, практическое значение имеет формо-

изменение мягких металлов, типа свинца, меди, олова и др., использующихся в качестве мягких покрытий при обеспечении герметичности сосудов высокого давления [7, 8].

Угол деформирующего инструмента β (рис. 1) составлял 0° , так как он имитировал деформирующий шарик либо ролик с радиусом достаточным для того, чтобы было возможно одновременно деформировать 5 микровыступов образца.

Толщина подложки микропрофиля соизмерима с его высотой, что является одним из условий получения качественной картины формоизменения микропрофиля, а также имеет практическое значение при деформировании покрытий. Условия деформирования – стесненные, так как элемент микропрофиля считается элементом поверхности деформируемого образца.

При конечно-элементном моделировании приняты следующие характеристики образца и индентора.

Характеристики образца: тип — шероховатая пластина; материал — свинец — упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 17000$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,42$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_T = 10$ МПа, модулем упрочнения $E_T = 200$ МПа.

Характеристики индентора: тип — гладкая пластина; материал — сталь ШХ15, закаленная; модуль упругости $E = 2.11 \times 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_T = 2000$ МПа, модулем упрочнения $E_T = 20000$ МПа. Для ускорения процесса КЭ расчета индентор приняли как жесткое тело (рис. 2), состоящее из 20 КЭ.

Одной из основных особенностей процесса является глубокое упруго-пластическое деформирование образца. Для корректного решения задачи были установлены следующие условия процесса:

1. материал образца и индентора упруго-пластический;
2. сетка образца и индентора гексагональная, причем у образца дополнительно введены узлы на ребрах КЭ;
3. коэффициент трения на контактной области между образцом и индентором принят 0,2 [9];
4. сетка на контактной области образца сгущена (рис. 2);
5. во избежание действия граничных эффектов по боковым граням образца толщину последнего взяли больше высоты микропрофиля.

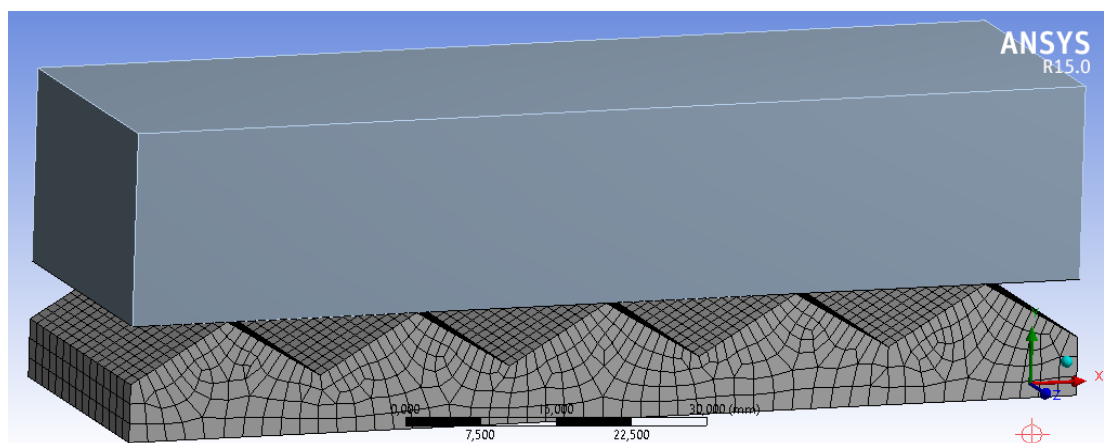


Рис. 2. Вид конечноэлементной сетки образца (число КЭ – 5576, узлов – 27445)

Граничные условия эксперимента были следующими (рис. 3):

1. перемещение по торцам образца ограничивали по оси oX (Displacement C, D);
2. перемещение по боковым граням ограничивали у образца по оси oZ (Displacement E, F);
3. нижнюю плоскость образца закрепляли полностью (Fixed Support A).

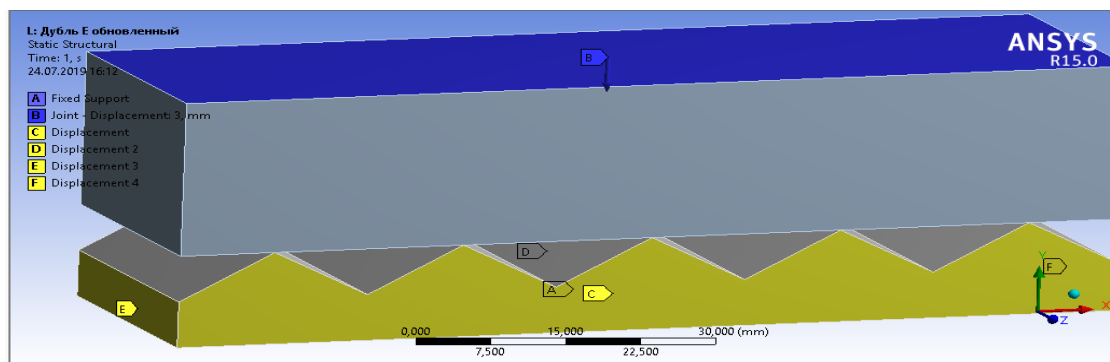


Рис. 3. Способ задания граничных условий и нагрузки

Микропрофиль деформировали, задавая вертикальное перемещение индентора на величину $0,5 h$ (Joint-Displacement B) (рис. 3), так как известно [8, 10–12], что при малых толщинах подложки при перемещении индентора на величину, превышающую $0,5 h$, вероятно полное выглаживание микропрофиля с дальнейшим проникновением в него индентора, что недопустимо по условиям задачи.

Результаты моделирования

Влияние степени деформирования микропрофиля ε_h на относительную ширину I_D , вертикальное смещение точки впадин микропрофиля I_h и изменение угла при основании деформированного микропрофиля α_D представлено на рис. 4.

Где: $I_D = \frac{D_i}{D}$, $I_h = \frac{S_i}{h}$, $\varepsilon_h = 100\%$ при $h = 6$ мм (рис. 1, 5).

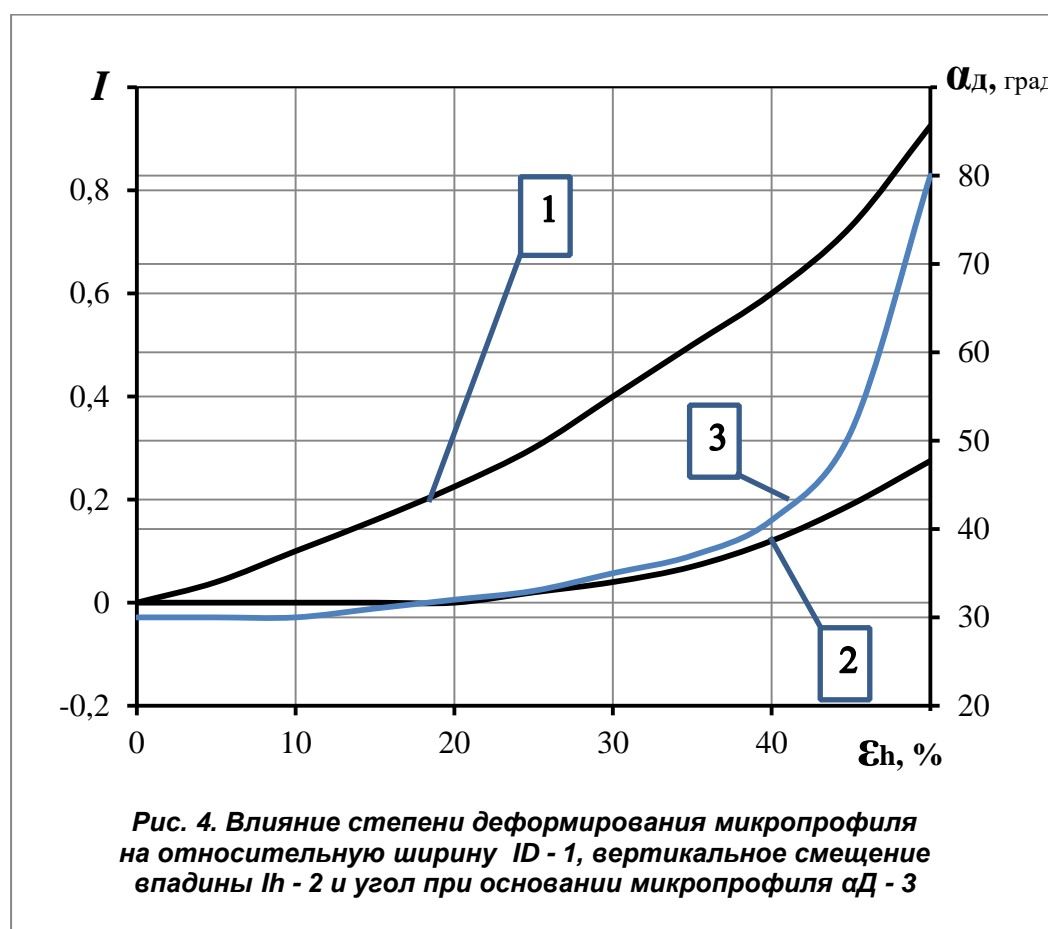


Рис. 4. Влияние степени деформирования микропрофиля на относительную ширину I_D - 1, вертикальное смещение впадины I_h - 2 и угол при основании микропрофиля α_D - 3

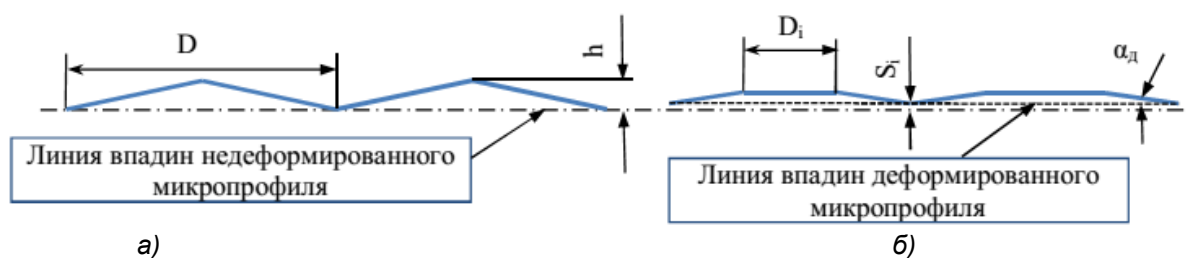


Рис. 5. Схема формоизменения модели шероховатости:
а – недеформированный профиль, б – профиль после i -ого деформирования;
 D – ширина впадины; D_i – ширина впадины после i -ого деформирования;
 h – высота микропрофиля;
 h_i – величина подъема впадины после i -ого деформирования;
 α_d – угол при основании деформированного микропрофиля

В результате расчета установлено, что с увеличением степени деформирования возрастает относительная ширина микропрофиля, причем до степени деформирования в 20 % возрастание происходит практически линейно до 0,225, а с превышением 20 % интенсивность возрастания повышается и достигает значения 0,925. Вертикальное смещение точки впадин микропрофиля до степени деформирования в 20 % не изменяется, затем, при деформировании 20–30 %, происходит незначительное поднятие точки впадины. При дальнейшем деформировании подъем точки впадины возрастает и достигает значения 0,275. Неизменное положение точки впадины на начальном этапе деформирования с последующим вертикальным поднятием объясняется следующим [13]: при вертикальном перемещении индентора на ϵ_h (рис. 6) под ним возникает площадка контакта с микропрофилем D_i , сопровождаемая появлением области пластической деформации с нижней границей, очерченной полудугами (рис. 6).

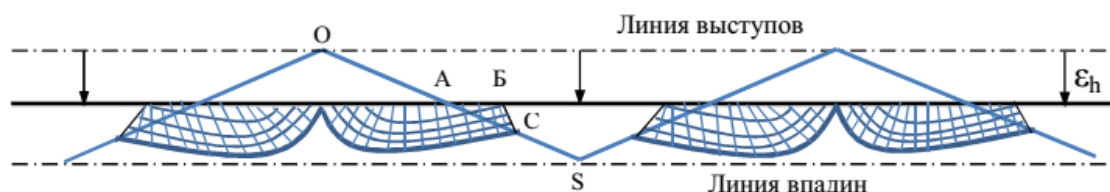


Рис. 6. Схема линий скольжения Чернова – Людерса при деформации микропрофиля

Так, при вытеснении металла с вершин микропрофиля свободная поверхность области пластической деформации займет положение BC (рис. 6), а при совмещении точек C и S линии скольжения соседних микронеровностей встретятся, и затем произойдет взаимодействие полей деформаций смежных микронеровностей, что и будет являться причиной подъема точки впадины S (рис. 5, 6). Изменение угла при основании деформированного микропрофиля также остается неизменным до степени деформирования в 15 %, затем, при деформировании до 40 %, угол возрастает до 41° , и при осадке микропрофиля на 50 % угол достигает 80° .

На рис. 7–10 представлены изополосы деформирования микронеровностей в вертикальном (oY) и горизонтальном (oX) направлениях при деформировании на 25 и 50 %.

Анализ изополос показывает, что при деформировании микропрофиля на 25 % поля пластических деформаций смежных микронеровностей сблизилась подобно полям линий скольжения (рис. 6, 7), а впадина микропрофиля совместно с недеформированными боковыми поверхностями начала смещаться вверх (рис. 8). При деформировании микропрофиля на 50 % (от первоначальной высоты профиля) видно, как произошло пластическое течение микропрофиля в горизонтальном направлении более 1 мм по обе стороны от пика микропрофиля (рис. 9), а также смятие пика микропрофиля, которое составило порядка 3 мм ($0,5 h$) (рис. 10). На рис. 10 также видно, как поднялась впадина микропрофиля, однако осталась незначительная площадь пустот. При этом глубина пустот составила около 1,4 мм – 23 % от первоначальной высоты профиля.

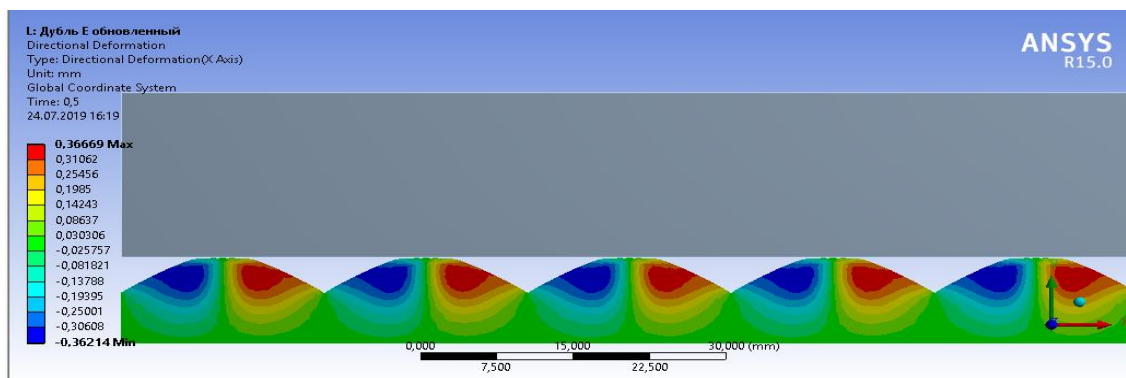


Рис. 7. Поля распределения пластических деформаций микропрофиля (направление OX , $\epsilon_n = 25\%$)

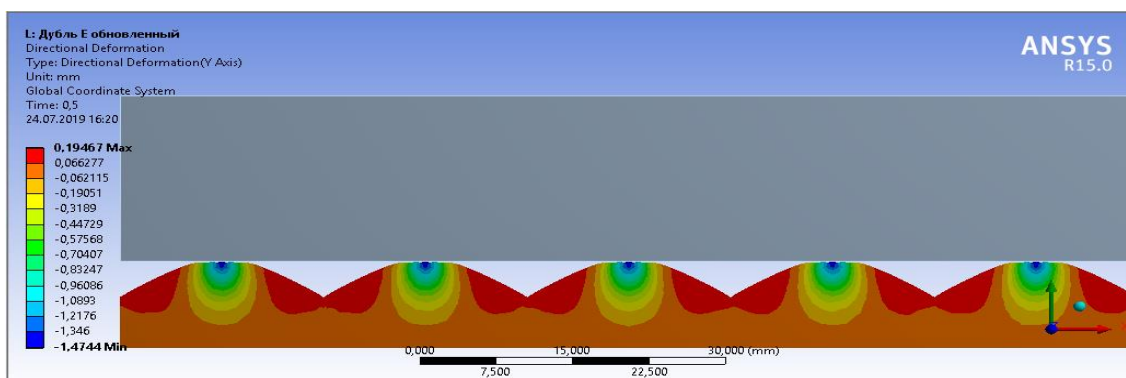


Рис. 8. Поля распределения пластических деформаций микропрофиля (направление OY , $\epsilon_n = 25\%$)

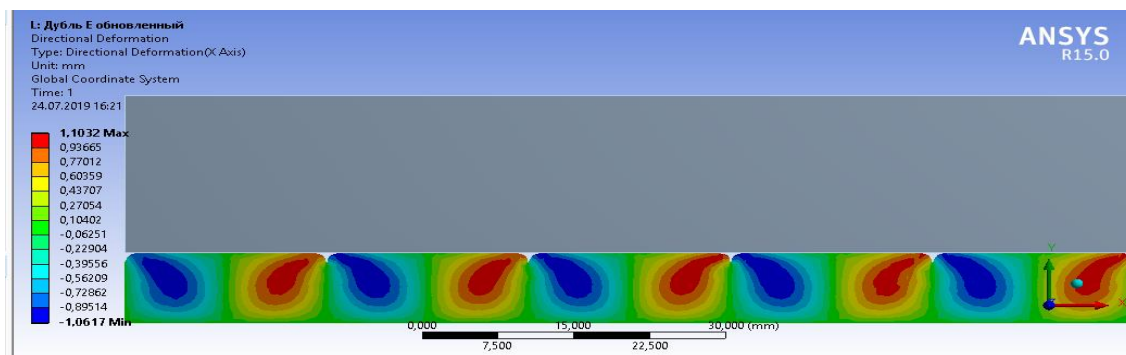


Рис. 9. Поля распределения пластических деформаций микропрофиля (направление OX , $\epsilon_n = 50\%$)

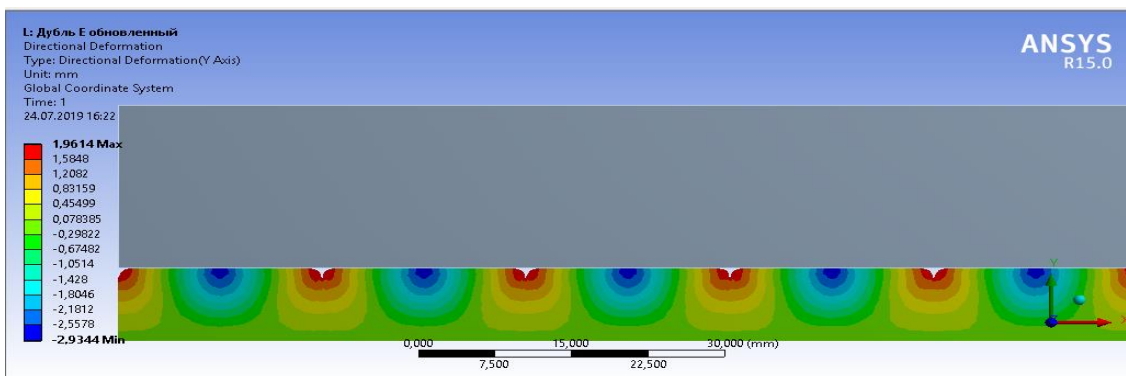


Рис. 10. Поля распределения пластических деформаций микропрофиля (направление OY , $\epsilon_n = 50\%$)

На рис. 11 представлено увеличенное изображение впадины микропрофиля.

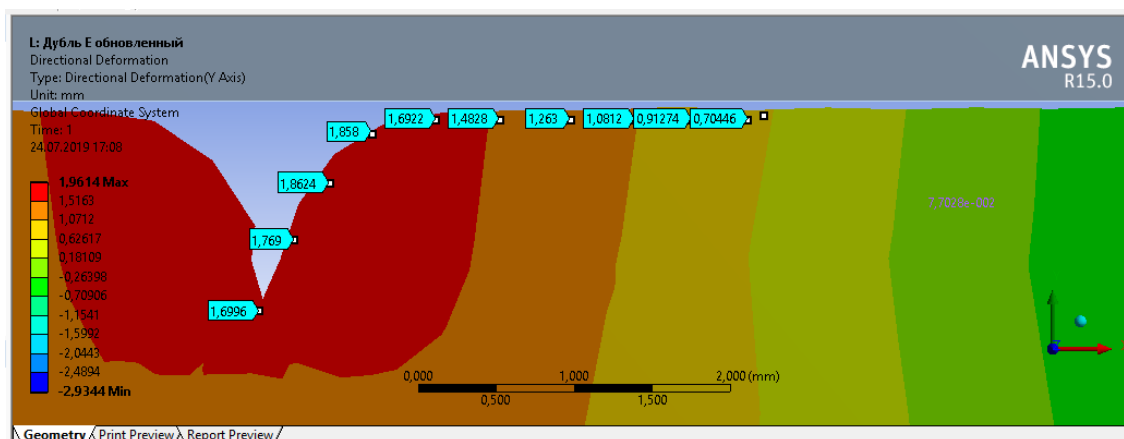


Рис. 11. Поля распределения пластических деформаций впадины микропрофиля (направление оУ, $\varepsilon_n = 50\%$)

Из рис. 11 видно, что боковая поверхность микропрофиля имеет криволинейную форму, что коррелирует с результатами экспериментальных исследований [10]. Также следует отметить, что при дальнейшем деформировании микропрофиля его полное выглаживание вероятно произойдет от поднятия впадин и сближения боковых поверхностей.

Заключение

Анализ результатов моделирования деформированного состояния объемного микропрофиля в плоскости XOY при его осадке на 50 % от первоначальной высоты в программе Ansys Workbench позволяет сделать следующие выводы:

1. установлено, что поднятие точки впадины начинается при 20–30 % осадки микропрофиля и достигает 0,275 от первоначальной высоты профиля;
2. относительная ширина микропрофиля достигла 0,925 от первоначальной ширины профиля, причем пластическое течение микропрофиля в горизонтальном направлении по обе стороны от его пика составило порядка 1 мм;
3. угол при основании деформированного микропрофиля достиг 80° ;
4. глубина пустот составила около 1,4 мм – 23 % от первоначальной высоты профиля. Смыкания боковых поверхностей микропрофиля не произошло. Необходимо отметить, что полное выглаживание микропрофиля вероятно произойдет от поднятия впадин и сближения его боковых поверхностей.

Библиографический список

1. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971. 207 с.
2. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений. М.: Наука, 1977. 100 с.
3. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
4. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.
5. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / под. общ. ред. Д.Г. Красковского. М.: Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
6. Chen Xiaolin, Liu Yijun Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. CRC Press, 2014. 411 p.
7. Погодин В.К., Лившиц В.И., Древин А.К. Экспериментальное исследование условий герметизации для уплотнительного соединения «тор-плоскость» // Машиноведение. 1974. № 1. С. 91.
8. 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: тез. докл. Всер. конф. Киев, 1980. С. 81–83.
9. Крагельский И.В., Виноградова И.В. Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962. 220 с.

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

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

12. 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.

13. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат, 1956. 407 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

Лэ Хонг Куанг,

аспирант группы аТМ-17,
кафедра машиностроительных технологий и материалов,
Институт авиационного машиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация,
e-mail: mybo91@gmail.com

Le Hong Quang,

Postgraduate,
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: mybo91@gmail.com

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