

**Я. Б. НЕМИРОВСКИЙ, Э. К. ПОСВЯТЕНКО, И. Ю. РОСТОЦКИЙ, Ю. А. ЦЕХАНОВ**

## ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОК

В статье приведены результаты изучения контактных явлений при деформирующем протягивании с использованием твердых смазок. Показано, что твердые смазки используются при черновом протягивании изделий из труднообрабатываемых материалов: хромоникельмолибденовых и нержавеющей сталей аустенитного класса, сплавов титана. Выполнен анализ необходимых условий для эффективного использования твердых смазок. Выбраны марки твердых смазок для обработки этих материалов. Разработана методика проведения исследования на натуральных образцах из стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0. Показаны особенности деформирования поверхностного слоя при использовании твердых смазок. Установлено отсутствие заметных деформаций сдвига в поверхностном слое обработанной заготовки. Высотный параметр Ra после каждого цикла деформации снижается незначительно, а микротвердость по толщине стенки практически не изменяется. Микрогеометрия обработанного поверхностного слоя мало отличается от исходной. Показано, что существующие модели для определения шероховатости обработанной поверхности не подходят к описанию процесса ее изменения при протягивании с использованием твердых смазок. Установлена функциональная связь между высотными параметрами шероховатости и относительным контактным давлением при обработке с использованием твердых смазок. Предложен теоретический расчет контактных давлений при раздате относительно тонкостенных заготовок с большими натягами. Определены области использования разработанной зависимости. Она должна использоваться только в том случае, когда контактные давления ниже критических. Результаты данной работы позволяют создать технологические расчетные схемы как для прогнозирования шероховатости обработанной поверхности, так и для обеспечения ее требуемого значения технологическими методами при черновом деформирующем протягивании изделий из труднообрабатываемых материалов с использованием различных смазок.

**Ключевые слова:** деформирующее протягивание, контактные явления, твердые смазки, труднообрабатываемые материалы, контактные давления, шероховатость, микротвердость обработанной поверхности.

**Я. Б. НЕМИРОВСЬКИЙ, Е. К. ПОСВЯТЕНКО, І. Ю. РОСТОЦЬКИЙ, Ю. А. ЦЕХАНОВ**

## ОСОБЛИВОСТІ КОНТАКТНИХ ЯВИЩ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТВЕРДИХ МАСТИЛ

У статті наведені результати вивчення контактних явищ при деформуючому протягуванні з використанням твердих мастил. Показано, що тверді мастила використовуються при чорновому протягуванні виробів з важкооброблюваних матеріалів: хромонікельмолібденових і нержавіючих сталей аустенітного класу, сплавів титану. Виконано аналіз необхідних умов для ефективного використання твердих мастил. Визначені марки твердих мастил для обробки цих матеріалів. Розроблено методику проведення дослідження на натурних зразках зі сталі 12Х18Н10Т і титанового сплаву ВТ1-0. Показано особливості деформування поверхневого шару при використанні твердих мастил. Встановлено відсутність помітних деформацій зсуву в поверхневому шарі обробленої заготовки. Висотний параметр Ra після кожного циклу деформації знижується несуттєво, а микротвердість по товщині стінки практично не змінюється. Геометрія обробленого поверхневого шару мало відрізняється від вихідної. Показано, що існуючі моделі для визначення шорсткості обробленої поверхні не підходять до опису процесу її зміни при протягуванні з використанням твердих мастил. Встановлено функціональний зв'язок між висотними параметрами шорсткості і відносним контактним тиском при обробці з використанням твердих мастил. Запропоновано теоретичний розрахунок контактної тиску при роздачі тонкостінних заготовок зі значними натягами. Визначені області використання розробленої залежності. Вона повинна використовуватися тільки в тому випадку, коли контактний тиск нижче критичного. Результати даної роботи дозволили створити технологічні розрахункові схеми як для прогнозування шорсткості обробленої поверхні, так і для забезпечення її необхідного значення технологічними методами при чорновому деформуючому протягуванні виробів з важкооброблюваних матеріалів при використанні різних мастил.

**Ключові слова:** деформуюче протягування, контактні явища, тверді мастила, важкооброблювані матеріали, контактний тиск, шорсткість, микротвердість обробленої поверхні.

**YA. NEMYROVSKYI, E. POSVYATENKO, I. ROSTOTSKYI, YU. TSEKHANOV**

## FEATURES OF CONTACT EVENTS DURING DEFORMING BROACHING USING SOLID LUBRICANTS

The article presents the results of the study of contact events with deforming broaching using solid lubricants. It is shown that solid lubricants are used for rough broaching of products from difficult-to-work materials: chromium-nickel-molybdenum and stainless steels of austenitic class, titanium alloys. The analysis of the necessary conditions for the effective use of solid lubricants was carried out. Selected brands of solid lubricants for processing these materials. A technique has been developed for conducting research on full-scale samples of 12H18N10T steel and VT1-0 titanium alloy. The features of the deformation of the surface layer using solid lubricants are shown. The absence of noticeable shear deformations in the surface layer of the processed billet has been established. The height parameter Ra after each deformation cycle decreases slightly, and the microhardness along the wall thickness practically does not change. Microgeometry of the treated surface layer is slightly different from the original. It is shown that the existing models for determining the roughness of the treated surface do not fit the description of the process of its change during broaching using solid lubricants. A functional connection has been established between the height parameters of roughness and relative contact pressure when processed using solid lubricants. A theoretical calculation of contact pressures for the processing of relatively thin-walled workpieces with large tensions is proposed. Identified areas of use of the developed dependencies. It should only be used when contact pressures are below critical. The results of this work make it possible to create technical design schemes both for predicting the roughness of the treated surface and for ensuring its required value by technological methods for rough deforming broaching of products from difficult-to-work materials using various lubricants.

**Keywords:** deforming broaching, contact events, solid lubricants, difficult-to-work materials, contact pressure, roughness, the microhardness of the treated surface.

**Введение.** Деформирующее протягивание смазок, что исключает схватывание инструмента с изделий из пластичных металлов и сплавов всегда материалом заготовки, снижает энергозатраты на осуществляется с использованием технологических процесс, а также улучшает качество обработанной

© Я. Б. Немировский, Э. К. Посвятенко, И. Ю. Росточкий, Ю. А. Цеханов, 2019

поверхности.

Наиболее широкое применение имеют жидкие смазки, которые используются как при финишных, так и при черновых операциях. При финишной обработке они позволяют получить высокие эксплуатационные свойства обработанной поверхности заготовки. В этом случае между обрабатываемой поверхностью и деформирующим элементом существует непосредственный контакт в условиях жидкого смазывания. Обработанная поверхность получает упрочнение и текстурированный слой на глубину до 0,2 мм, сжимающие остаточные напряжения, которые превышают предел текучести обрабатываемого материала, низкую шероховатость ( $Ra \leq 0,1 \mu\text{м}$ ), улучшенный микрорельеф, а также достигается высокая точность обработанного отверстия. Все это способствует повышению эксплуатационных характеристик готовой детали.

По данным работы [1] наиболее распространенными жидкими смазками являются смазки на масляной основе: сульфозрезол, минеральные масла класса МР, а также масла растительного происхождения. Для обработки цветных материалов применяется 10%-ный раствор мыла в воде.

Роль смазки при протягивании твердосплавными деформирующими элементами становится особенно значимой при деформировании деталей из труднообрабатываемых материалов: хромоникельмолибденовых и нержавеющей сталей аустенитного класса, сплавов титана. В этих случаях значительные деформации отверстия при протягивании с жидкими смазками становятся невозможными из-за адгезионного схватывания инструмента с деталью. Тогда используют твердые смазки, которые характеризуются высокими экранирующими свойствами [1].

Это дает возможность для таких материалов использовать деформирующее протягивание в качестве черновой операции формообразования, основной целью которой является повышение коэффициента использования материала на последующих операциях механической обработки. В этом случае главной характеристикой используемой смазки должны быть не антифрикционные, а экранирующие свойства, то есть способность исключения непосредственного контакта инструмента с изделием. Этому требованию соответствует ряд твердых смазок, которые обеспечивают также и адгезионные свойства. Они должны надежно закрепляться на обрабатываемой поверхности и локализовывать в себе большие сдвиговые деформации в самом слое смазки.

В ИСМ НАН Украины разработан ряд твердых смазок на основе эпоксидных смол и твердых наполнителей типа графита, дисульфида молибдена, нитрида бора [1] и др. Для улучшения экранирующих свойств их иногда модифицируют кремнийорганическими соединениями [2]. Это позволяет обрабатывать при деформациях до 10% отверстия в заготовках из следующих материалов:

нержавеющие и жаропрочные сплавы, закаленные стали 30ХГСА, ЭИ643, 30ХНМА, 38ХМЮА, термообработанные сплавы алюминия АК6, Д16, трубы из ванадия и ниобия, а также детали из титановых сплавов ВТ-0, ВТ-6, ВТ-22 [1,3].

Эффективность использования твердых смазок резко возрастает при больших контактных давлениях:  $q \geq 1 \text{ ГПа}$ , когда жидкие смазки не всегда обеспечивают отсутствие схватывания даже при обработке обычных конструкционных материалов. Твердые же смазки не только обеспечивают отсутствие схватывания, но имеют и более низкий коэффициент трения ( $f = 0,02-0,04$ ), который в 2-3 раза ниже, чем коэффициент трения при использовании жидких смазок. Это позволяет значительно снизить энергозатраты процесса.

**Цель работы.** Исследование механики деформирующего протягивания в контактной зоне при обработке с использованием твердых смазок.

Это позволит выявить особенности протекания процесса и установить его влияние на показатели качества обработанной поверхности. В свою очередь исследования обеспечат расширение области применения деформирующего протягивания за счет создания новых технологических процессов обработки труднообрабатываемых материалов.

**Методика исследований.** Эксперименты проводились на втулках из стали 12Х18Н10Т с размерами: диаметр отверстия  $d_0 = 35 \text{ мм}$ , толщина стенки  $t_0 = 35 \text{ мм}$ , длина  $l_0 = 250 \text{ мм}$ . Исходная шероховатость поверхности отверстия после растачивания  $Ra = 3-4 \text{ мкм}$ .

И на втулках из титанового сплава ВТ1-0 с размерами:  $d_0 = 35 \text{ мм}$ ,  $t_0 = 4; 7; 9 \text{ мм}$ ,  $l_0 = 250 \text{ мм}$  и  $d_0 = 19 \text{ мм}$ ,  $t_0 = 4; 7; 9 \text{ мм}$ ,  $l_0 = 150 \text{ мм}$ .

Протягивание осуществляли на горизонтально протяжном станке мод. 7Б520 и на специальном стенде, разработанном в ИСМ НАН Украины, позволяющим осуществлять прошивание заготовки с усилием до 100 кН.

При протягивании заготовок из стали 12Х18Н10Т использовали твердую смазку АСМ-6 [1], в состав которой входят лак Ф-9-К, дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$  и толуол. Ранее [1] было установлено, что эта смазка выдерживает без разрушения контактные давления порядка 2,5 ГПа и весьма значительные деформации отверстия (до 15%).

При протягивании заготовок из титанового сплава ВТ1-0 использовали твердую смазку на основе диановой эпоксидной смолы с ангидридным отвердителем и наполнителем - коллоидным графитом, модифицированную введением кремнийорганических соединений и высокодисперсного углеродного наполнителя [2]. Указанная смазка выдерживает без разрушения контактные давления до 3,2 ГПа, что позволяет осуществлять весьма значительные деформации при раздате отверстия.

Шероховатость измеряли по параметру  $Ra$  вдоль образующей отверстия после каждого цикла деформации, то есть после каждого пропущенного деформирующего элемента, а также снимали

профилограммы поверхности до и после обработки. Измерение производили на профилометре-профилографе «Talysurf-5M-120» и на ВЭИ-Калибр мод. 201. После каждого цикла протягивания отрезали часть обработанной втулки длиной 10–15 мм, с которой твердая смазка удалялась ацетоном, и измеряли шероховатость.

В некоторых случаях исследование шероховатости и условий контактного взаимодействия производили с использованием поперечных шлифов на приборах «Микрон-гамма», конструкции Национального авиационного университета Украины.

Твердость образцов по Виккерсу измеряли на твердомере ХПО-250, а микротвердость – на приборе ПМТ-3 при нагрузках 50 и 200 грамм.

**Результаты исследований.** На рис. 1, приведены параметры качества поверхности, обработанной деформирующим протягиванием втулок из стали 12Х18Н10Т с применением твердой смазки на основе дисульфида молибдена.

Как видно, высотные параметры шероховатости снижаются с увеличением суммарной деформации раздачи, однако снижение происходит не так интенсивно как при применении жидких смазок [3], что, по-видимому, указывает на уменьшение сдвиговых деформаций в поверхностном слое. Профиль шероховатости обработанной поверхности втулки из стали 12Х18Н10Т предварительно расточенной и протянутой с использованием твердых смазок (рис. 2, а) также практически не изменяется. Также незначительно изменяется опорная поверхность на уровне средней линии (рис. 2, б).

После расточки исходная площадь опорной поверхности была 40%, а после 4 циклов деформирования она увеличилась всего на 6–7%. Это также подтверждается результатами измерения твердости обработанной поверхности (рис. 1, кривая 3), микротвердости поверхности и микротвердости материала на некоторой глубине от обработанной поверхности (рис. 1, кривая 2).

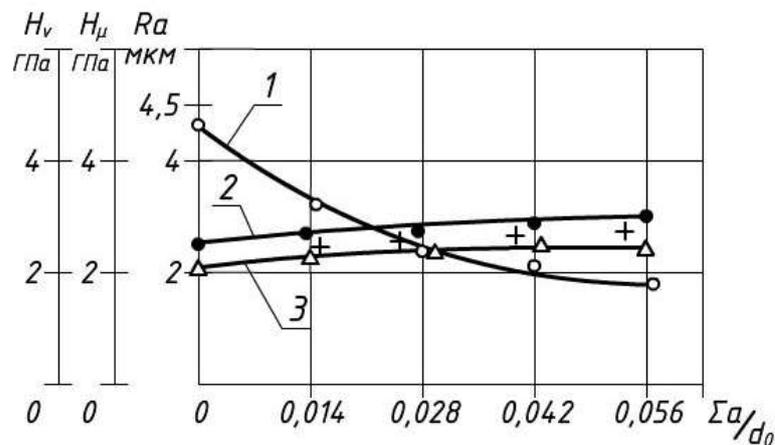


Рисунок 1 – Зависимость шероховатости ( $Ra$ ), твердости  $H_V$ , микротвердости  $H_{\mu 50}$  от суммарной деформации при обработке втулок из стали 12Х18Н10Т:  $t_0/d_0 = 0,22$  при использовании твердой смазки АСМ-6: 1 –  $Ra$ , 2 –  $H_{\mu 50}$  (● – на поверхности, + – на глубине 0,5 мм), 3 –  $H_V$

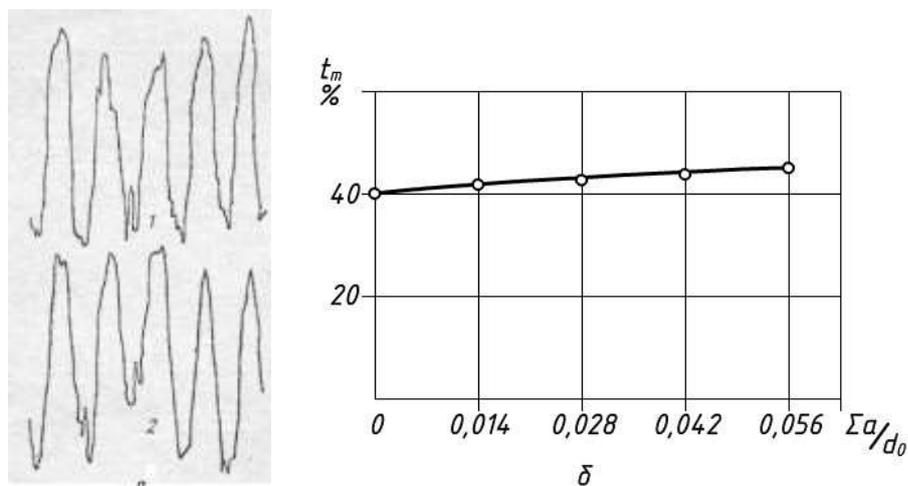


Рисунок 2 – Профиль исходной и обработанной поверхности (а) и опорная длина профиля на уровне средней линии (б): 1 – исходная поверхность после растачивания, 2 – поверхность после 4 циклов деформирования

Подобные результаты получены при деформировании заготовок из титанового сплава ВТ1-0 при применяемых деформациях отверстий до 6% (рис. 3). При обработке этих заготовок также использовалась твердая смазка на основе эпоксидной смолы с наполнителем коллоидным графитом, модифицированная кремнийорганическими соединениями и высокодисперсным углеродным наполнителем [2].

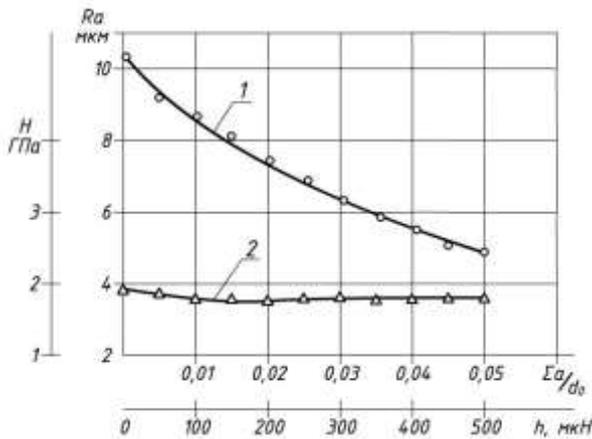


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости (1) и микротвердости (2) от суммарной деформации при обработке втулок из титанового сплава ВТ1-0 с  $t_0/d_0 = 0,21$  при использовании твердой смазки на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-5 с коллоидным графитом в качестве наполнителя и модифицированной кремнийорганическими соединениями

В этом случае также отсутствуют заметные деформации сдвига в поверхностном слое, что подтверждается данными, приведенными на рис. 3. Из них следует, что высотный параметр Ra после каждого цикла снижается незначительно, что обусловлено влиянием в основном окружной деформации отверстия. Поэтому изменение микротвердости по толщине стенки почти незаметно. Это качественно отличается от известного характера изменения этого показателя при использовании жидких смазок, которые обуславливают образование текстуры и создание значительного градиента изменения упрочнения по толщине стенки [3].

Указанные особенности деформирования поверхностного слоя при использовании твердых смазок подтверждаются фотографиями шлифов контактной зоны, полученными на приборе «Микрон-гамма». Он позволяет получить не только реальную картину взаимодействия инструмента с обработанной поверхностью, но и определить при помощи масштабной линейки (1 деление – 10 мкм) высоту микронеровностей. Как видно (рис. 4), между контактирующими поверхностями присутствует слой твердой смазки, который за счет своих экранирующих свойств локализует в себе сдвиговые деформации. Микрогеометрия обработанного поверхностного слоя мало отличается от исходной. То есть, как указывалось выше, ее изменение вызвано, в основном, влиянием окружной деформации отверстия –  $\sum a/d_0$ .



Рисунок 4 – Контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью при использовании твердой смазки

Некоторые различия в значениях шероховатости (рис. 1 и 2) обусловлены ее разными исходными значениями. Для относительной шероховатости  $\frac{Ra}{Ra_{исх}}$

экспериментальные точки для разных материалов ложатся практически на одну кривую (рис. 5), что свидетельствует, по-видимому, о близких экранирующих свойствах примененных твердых смазок.

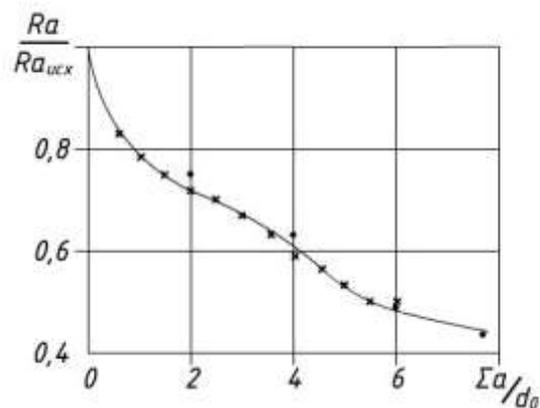


Рисунок 5 – Зависимость параметра  $\frac{Ra}{Ra_{исх}}$  при обработке

втулок: × – из титана ВТ1-0:  $t_0/d_0 = 0,21$ ,

$a_0/d_0 = 0,005$ ; • – из нержавеющей стали 12Х18Н10Т:

$t_0/d_0 = 0,22$ ,  $a_0/d_0 = 0,014$

При деформировании этих втулок определялись нормальные контактные давления. Их изменение в зависимости от деформации показано на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что существующие модели для определения шероховатости обработанной поверхности после деформирующего протягивания, приведенные в работе [4], не подходят к описанию процесса изменения шероховатости при протягивании с использованием твердых смазок.

Одна из этих моделей, применяемая при малоцикловом деформировании, построена на основе схемы осадки конуса или призмы. При этом аналитически была установлена связь высотных параметров шероховатого слоя с суммарным контактным давлением  $\sum q$ , накопленным на каждом цикле деформации [4].

Другая модель этой работы получена для расчета изменения высотных параметров шероховатости при многоцикловом деформировании и учитывает влияние не только нормальных нагрузок, но и касательных,

обусловленных силами трения между контактирующими поверхностями. В этом случае процесс уменьшения высотных параметров шероховатости происходит не только от сдвливания под действием нормальной нагрузки, но и от массопереноса, обусловленного «заваливанием» микронеровностей под действием силы трения, возникающей при использовании жидких смазок (рис. 7). Причем, с увеличением числа циклов деформации влияние силы трения на микрорельеф возрастает. Одновременно с уменьшением высоты микронеровностей происходит заполнение впадин за счет массопереноса материала микровыступов от действия трения.

При протягивании с использованием твердых смазок происходит несколько иное явление. В этом случае процесс раздачи происходит при отсутствии сил трения на поверхности заготовки, которые локализуются в слое твердой смазки (рис. 4). Поэтому при использовании больших натягов на деформирующий элемент и малых углов рабочего конуса инструмента, когда контактные давления невысокие и не превышают значение критического контактного давления для данного материала заготовки [3], схема раздачи будет близка к раздаче трубы внутренним давлением.

Для технологических расчетов, связанных с прогнозированием и с обеспечением требуемой шероховатости, необходимо установить связь высотных параметров шероховатости с контактным давлением  $q$ .

Как известно [3], величина  $q$  пропорциональна твердости обрабатываемого материала. Проанализируем зависимость относительной шероховатости  $\frac{Ra}{Ra_{исх}}$  от безразмерного контактного давления  $q/HV$  (рис. 8). Видно, что эта зависимость практически линейная и не зависит от

обрабатываемого материала:

$$\frac{Ra}{Ra_{исх}} = 1 - 0,36 \frac{q}{HV}. \quad (1)$$

В работах [1,3] на основе анализа значительного количества экспериментальных данных, предложены эмпирические расчетные зависимости для определения  $q$  в зависимости от технологических факторов и свойств обрабатываемых материалов.

Для этого экспериментально определяется осевая сила протягивания и длина контакта  $l$ . По формуле (2) рассчитывается среднее значение контактного давления:

$$q = \frac{Q \cos \eta}{\pi d_0 l \sin(\alpha + \eta)}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – угол трения,  $\eta = \arctg f$ ,  $f$  – коэффициент трения,  $\alpha$  – угол наклона образующей рабочего конуса деформирующего элемента.

Коэффициент трения для твердых смазок определялся экспериментально и аппроксимировался зависимостью:

$$f = C_{fm} q^{-xm}. \quad (3)$$

Значение коэффициентов  $C_{fm}$  и  $xm$  для наших условий обработки приведены в таблице 1.

В работе [6] предложена расчетная схема определения  $q$  при обработке с малыми натягами существенно толстостенных заготовок с «бесконечной толщиной стенки» [3], когда  $t_0 \geq d_0$ . Однако она корректна для расчета контактного давления, когда его величина превышает значение критического давления [3].

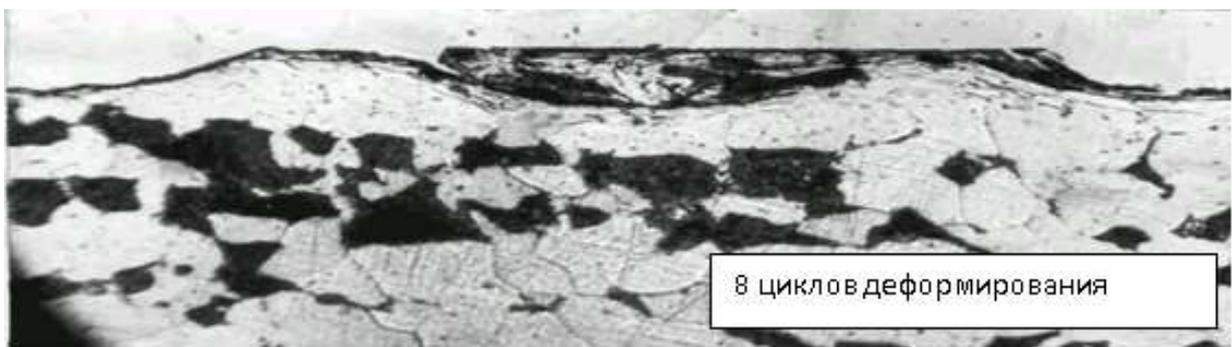


Рисунок 7 – Характер деформирования микровыступа заготовки из стали 45 при числе циклов деформирования равных 8;  $\times 500$

Таблица 1 – Значение коэффициентов  $C_{fm}$  и  $xm$  для различных смазок

Смазка	$C_{fm}$	$xm$
нержавеющая сталь 12X18H10T	0,087	1,05
титановый сплав BT1-0	0,048	0,98

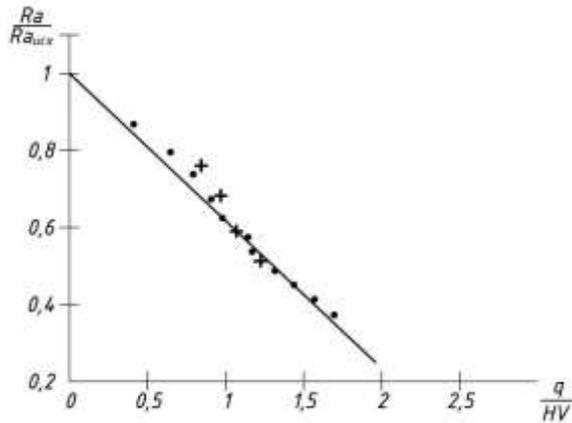


Рисунок 8 – Зависимость относительного высотного параметра шероховатости от относительного контактного давления при обработке заготовок из титана ВТ1-0 (●):  $t_0/d_0 = 0,21$ ,  $a_0/d_0 = 0,0028$ ; из нержавеющей стали 12X18H10T (×):  $t_0/d_0 = 0,22$ ,  $a_0/d_0 = 0,014$

Таким образом, для технологических расчетов параметров шероховатости нам необходимо знать контактное давление, твердость обрабатываемого материала и исходную шероховатость поверхности отверстия.

На основе полученных в данной работе результатов, можно предложить теоретический метод расчета контактных давлений при раздаче относительно тонкостенных заготовок с большими натягами, когда контактные давления ниже критических. Отметим актуальность этого вопроса. Большие степени раздачи применяются для черновых формообразующих операций, а для такой обработки заготовок из вышеописанных труднообрабатываемых материалов используются именно твердые технологические смазки.

Поскольку, как показано выше, величина шероховатости обработанной поверхности зависит только от суммарной степени деформации отверстия, то естественно предположить, что в случае применения твердых смазок, процесс деформирования будет близким к схеме раздачи трубы внутренним давлением. Как показано в работах [4,5], такая расчетная схема приемлема для деформирующего протягивания при определении деформации разрушения заготовок и их геометрических параметров после протягивания.

Поэтому используем эту модель для определения контактных давлений для нашего случая. Расчетная схема представлена на рис. 9.

Пусть упрочнение материала заготовки аппроксимируется зависимостью:

$$\sigma_0 = \sigma_T + Ae_0^n, \quad (4)$$

где  $\sigma_0$  и  $e_0$  – интенсивность напряжений и интенсивность пластических деформаций;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $A$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты.

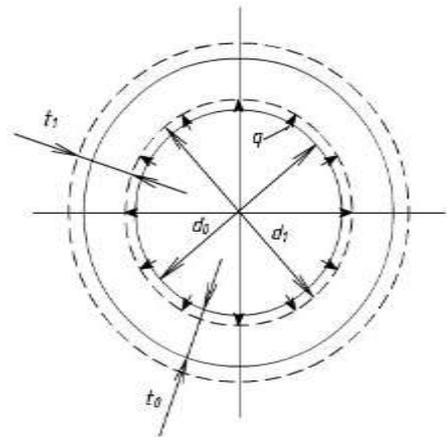


Рисунок 9 – Расчетная схема раздачи

Для относительно тонкостенных заготовок, средняя окружная деформация:

$$e_\varphi = \frac{\sum a}{d_0} = \sum \bar{a}. \quad (5)$$

При отсутствии осевого стеснения

$$e_0 = e_\varphi = \sum \bar{a}. \quad (6)$$

Тогда  $\sigma_0 = \sigma_T + A(\sum \bar{a})^n$ . (7)

Удельная работа пластических деформаций (в единице объема)

$$A^* = \sigma_0 e_0 = \sigma_T e_0 + Ae_0^{n+1}. \quad (8)$$

Полная работа пластических деформаций

$$A = A^* \cdot V_0, \quad (9)$$

где  $V_0$  – исходный объем заготовки, которой при деформировании не меняется:

$$V_0 = \pi d_0 t_0 L_0, \quad (10)$$

$L_0$  – длина заготовки.

С учетом (10):

$$A = \pi d_0 t_0 L_0 \left[ \sigma_T \sum \bar{a} + A(\sum \bar{a})^{n+1} \right]. \quad (11)$$

Элементарная работа на приращении диаметра  $d(\sum \bar{a})$ :

$$dA = \pi d_0 t_0 L_0 \left[ \sigma_T d \sum \bar{a} + A(n+1)(\sum \bar{a})^n d(\sum \bar{a}) \right]. \quad (12)$$

С другой стороны она производится текущим контактным давлением  $q$  на приращении  $d(\sum \bar{a})$ :

$$dA = q\pi d_0 t_0 L_0 d(\sum \bar{a}). \quad (13)$$

Приравняв выражения (12) и (13) получим:

$$q = \frac{t_0}{d_0 + \sum \bar{a}} \left[ \sigma_T + A(n+1)(\sum \bar{a})^n \right]. \quad (14)$$

Здесь учтено, что текущее значение диаметра отверстия  $d_1 = d_0 + \sum \bar{a}$ .

Для расчета контактных давлений по зависимости (14) необходимо знать размеры заготовки и кривую упрочнения ее материала. Определим область использования формулы (14) сравнением расчетных и экспериментальных (по [3]) значений  $q$  (рис.10) для случая обработки заготовок из стали 20 и стали 45.

Для стали 20 кривая течения аппроксимировалась зависимостью  $\sigma = 220 + 624e^{0.473}$  (Мпа), а для стали 45 –  $\sigma = 350 + 1180e^{0.5}$  (Мпа). Как видно, хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных (рис.10.а, кривые 2 и 3 и 10.б, кривая 2) наблюдается при значениях контактных давлений ниже критических, которые, согласно данных [3], приводят к появлению в очаге деформации локальной зоны пластического деформирования в виде наплыва. Она вызывает появление осевого течения обрабатываемого материала и больших сдвиговых деформаций (текстуры). При наличии критических контактных давлений расчетные контактные давления значительно ниже экспериментальных (рис. 10, а, кривые 1 и 2 и рис.10, б, кривые 1 и 2).

Это обусловлено несоответствием условий деформирования заготовки схеме раздачи трубы внутренним давлением. Из этого можно сделать следующий вывод: теоретический расчет контактного давления по зависимости (14) можно осуществлять при контактных давлениях меньше критических. Авторами [3] установлено, что для стали 45 критические контактные давления равны 0,87 ГПа, а для стали 20 – 0,78 ГПа. При контактных давлениях равных и выше критических их расчет необходимо осуществлять по зависимости (2) либо по методике, приведенной в работе [6]. Значение  $q$  зависит от режимов протягивания и размеров заготовки

Толщина стенки, при которой появляются критические контактные давления, зависит от натяга на элемент, угла  $\alpha$ , а также схемы протягивания и определяется, по экспериментально полученным зависимостям (15) и (16) для схем растяжения и сжатия соответственно [7]:

$$t_0/d_0 = 3,39 \left( a/d_0 \right)^{0.75} \cdot \alpha^{-\left(0,17+14,3a/d_0\right)}. \quad (15)$$

$$t_0/d_0 = \left( 0,11 + 10,24 a/d_0 \right) \cdot \alpha^{-\left(0,17+11,6a/d_0\right)}. \quad (16)$$

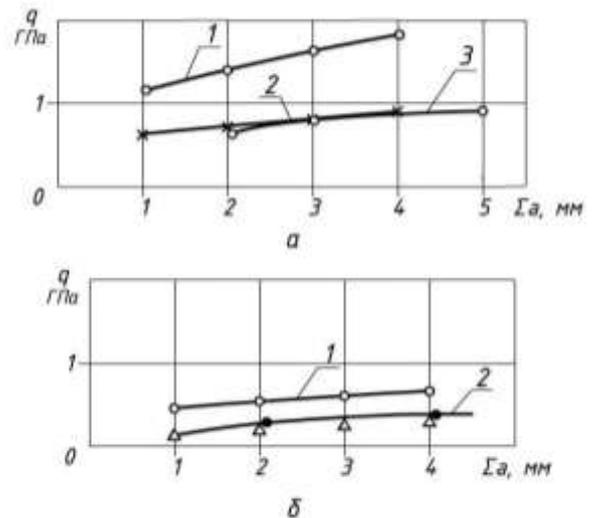


Рисунок 10 – Зависимость контактных давлений от суммарной деформации при обработке заготовок: а) из стали 45:  $t_0/d_0 = 0,136$ ,  $a_0/d_0 = 0,015$ : 1 – эксперимент, 2 – расчет по (14), 3 –  $a_0/d_0 = 0,03$  (эксперимент и расчет по (14)); б) из стали 20:  $t_0/d_0 = 0,65$ ,  $a_0/d_0 = 0,015$ : 1 – эксперимент, 2 – расчет по (14) ( $\Delta$ );  $a_0/d_0 = 0,03$  ( $\bullet$ ) – расчет по (14) и эксперимент.

Они и позволяет определить условия использования формулы (14).

Таким образом, результаты данной работы позволяют создать технологические расчетные схемы, как для прогнозирования шероховатости обработанной поверхности, так и для обеспечения ее требуемого значения технологическими методами при черновом деформирующем протягивании изделий из труднообрабатываемых материалов.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют:

- выполнить анализ необходимых условий для эффективного использования твердых смазок;
- вскрыть особенности деформирования при использовании твердых смазок;
- установить функциональную связь между высотными параметрами шероховатости и относительным контактным давлением при обработке с использованием твердых смазок;

получить теоретическую зависимость для расчета контактных давлений и установить, что область ее эффективного применения ограничена условием, согласно которому эти давления не должны превышать своего критического значения.

#### Список литературы

1. Розенберг А. М., Розенберг О. А., Посвятенко Э. К., Бусел Ю. Ф., Гриценко Э. И., Крицкий А. Д. *Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания* / АН УССР. ИСМ. Киев: Наук. думка, 1978. 256 с.

2. Розенберг О. А., Пашченко Е. А., Шейкин С. Е., Ростотский И. Ю. О выборе технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из титановых сплавов. *Технологические системы*. 2007. № 2 (38). С. 27–32.
  3. Розенберг А. М., Розенберг О. А. *Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания* / отв. ред. Родин П. Р. Киев: Наук. думка, 1990. 320 с.
  4. Балаганская Е. А., Голоденко Б. А., Немировский Я. Б., Цеханов Ю. А. *Математическое моделирование процесса деформирующего протягивания* / М-во образования Рос. Федерации. Воронежская гос. технол. акад. Воронеж: Воронежская гос. технол. акад., 2001. 194 с.
  5. Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е. *Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании* / М-во образования Рос. Федерации. Воронеж. гос. технол. акад. Воронеж: Воронежская гос. технол. акад., 2001. 200 с.
  6. Цеханов Ю. А., Розенберг О. А., Дель Г. Д. Напряженное состояние при деформирующем протягивании толстостенной трубы. *Известия вузов: Машиностроение*. 1976 г. № 5. С. 153–156.
- Немировский Я. Б., Цеханов Ю. А., Балаганская Е. А. Исследование изменения размеров полых осесимметричных заготовок при раздате их деформирующим протягиванием. *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением*. 2005. № 2. С. 12–15.
- References (transliterated)**
1. Rosenberg A. M., Rozenberg O. A., Posvyatyenko E. K., Busel Y. F., Gritsenko E. I., Kritsky A. D. *Raschet i proektirovanie tverdosplynykh deformiruyuschih protyazhek i processa protyagivaniya* [Calculation and design of hard-alloy deforming broaches and the process of broaching] / AN USSR. IMS. Kiev, Naukova dumka, 1978. 256 p.
  2. Rosenberg O. A., Pashchenko E. A., Sheikin S. E., Rostotsky I. Yu. O vybere tehnologicheskikh smazok dlya deformiruyushego protyagivaniya detaley iz titanovih splavov [On the choice of technological lubricants for deforming broaching of parts made of titanium alloys]. *Technological systems*. 2007, no. 2 (38), pp. 27–32.
  3. Rosenberg A. M., Rosenberg O. A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v processah rezaniya i deformiruyushego protyagivaniya* [Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming broaching] / rep. ed. Rodin P. R. Kiev? Naukova dumka, 1990. 320 p.
  4. Balaganskaya E. A., Golodenko B. A., Nemyrovskiy Ya. B., Tsekhanov Yu. A. *Matematicheskoe modelirovanie processa deformiruyushego protyagivaniya* [Mathematical modeling of the process of deforming broaching] / Ministry of Education Rus. Federation. Voronezh State. technol. Acad. Voronezh, Voronezh State. technol. Acad., 2001. 194 p.
  5. Tsekhanov Yu. A., Sheikin S. Ye. *Mekhanika formoobrazovaniya zagotovok pri deformiruyuschem protyagivanii* [Mechanics of shaping blanks during deforming broaching] / Ministry of Education Rus. Federation. Voronezh. state technol. Acad. Voronezh, Voronezh State. technol. Acad., 2001. 200 p.
  6. Tsekhanov Yu. A., Rosenberg O. A., Del G. D. Napryazhennoe sostoyanie pri deformiruyuschem protyagivanii tolstostennoi truby [Stress state during deforming broaching of a thick-walled pipe]. *News of universities: Engineering*. 1976, no. 5, pp. 153–156.
- Nemyrovskiy Ya. B., Tsekhanov Yu. A., Balaganskaya Ye. A. Issledovanie izmeneniya razmerov polyh osesimetrichnih zagotovok pri razdache ih deformiruyuschym protyagivaniem [Investigation of changes in the dimensions of hollow axisymmetric blanks when processing by deforming broaching]. *Forging and stamping production. Processing of materials by pressure*. 2005, no. 2, pp. 12–15.

Надійшла (received) 25.04.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Немировський Яков Борисович (Немировский Яков Борисович, Yakov Nemyrovskiy)** – доктор технічних наук, професор кафедри Центральноукраїнського технічного університету; м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8005-8584>; e-mail: [provotorova1951@gmail.com](mailto:provotorova1951@gmail.com)

**Посвятенко Едуард Карпович (Посвятенко Эдуард Карпович, Eduard Posvyatenko)** – доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6606-1365>; e-mail: [natali1963@ukr.net](mailto:natali1963@ukr.net).

**Ростоцький Ігор Юрійович (Ростоцкий Игорь Юрьевич, Igor Rostotskiy)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>; e-mail: [@gmail.com](mailto:@gmail.com)

**Цеханов Юрій Олександрович (Цеханов Юрий Александрович, Yuriy Tsekhanov)** – доктор технічних наук, професор, Вороніжський державний технічний університет; м. Вороніж, Росія; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1315-8491>; e-mail: [tsekhanov@yandex.ru](mailto:tsekhanov@yandex.ru).