

УДК 669.018.2

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/10>

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

©*Гасанова С. М.*, ORCID: 0009-0000-4392-7672, канд. техн. наук, Азербайджанский университет кооперации, г. Баку, Азербайджан, [sewramgasanova@mail.ru](mailto:sewramgasanova@mail.ru)

## MECHANISMS GOVERNING SURFACE HARDENING OF POROUS COMPONENTS DURING PLASTIC DEFORMATION

©*Gasanova S.*, ORCID: 0009-0000-4392-7672, Ph.D., Azerbaijan Cooperation University, Baku, Azerbaijan, [sewramgasanova@mail.ru](mailto:sewramgasanova@mail.ru)

*Аннотация.* В современной машиностроительной и приборостроительной отраслях с каждым годом расширяется сфера применения материалов, получаемых методами ковочной металлургии. Эти материалы отличаются высокой материальной эффективностью, возможностью получения деталей сложной формы, автоматизацией производственных процессов и экономической целесообразностью. Успешное применение и длительная эксплуатация изделий из ковочных материалов в промышленности требуют глубокого и систематического изучения их технологических, механических и триботехнических свойств. Научная ценность статьи в том, что в ней проанализированы существующие модели, объясняющие поведение пористых материалов, полученных методом металлургического спекания, в процессе поверхностной пластической деформации, и преодолены их ограничения. Впервые предложена новая пластическая модель, которая одновременно учитывает как изменение пористости, так и упрочнение материальной основы для пластического поведения пористого тела. Практическая значимость работы заключается в разработке некоторых методов упрочнения поверхности обожженных пористых растворов на основе железа и выборе наиболее эффективных способов пластической деформации на основе результатов проведенных исследований. Предложены новые обожженные материалы, синтезированные из смеси железа и чугуновых сплавов, и разработаны методы упрочнения поверхности путем пластической деформации.

*Abstract.* In modern mechanical engineering and instrument-making industries, the range of applications of materials produced by powder metallurgy methods is expanding year by year. These materials are characterized by high material efficiency, the ability to manufacture components with complex geometries, a high degree of production process automation and overall economic feasibility. The effective use and long-term operation of products made from powder metallurgy materials in industry require thorough and systematic investigation of their technological, mechanical and tribotechnical properties. The scientific value of the article lies in the analysis of existing models that explain the behavior of porous materials produced by metallurgical sintering under conditions of surface plastic deformation and in overcoming their inherent limitations. For the first time, a new plasticity model is proposed that simultaneously accounts for changes in porosity and for the strengthening of the material matrix governing the plastic behavior of a porous body. The practical significance of the work lies in the development of several methods for surface hardening of sintered iron-based porous materials and in the selection of the most effective modes of plastic deformation

based on the results of the conducted studies. New sintered materials synthesized from mixtures of iron and cast iron alloys are proposed, and techniques for surface strengthening through plastic deformation are developed.

*Ключевые слова:* металлургия сплавов, пористые материалы, механика и инструментостроение, пластическая модель, скорости напряжения и деформации, упрочнение поверхности, пластическая деформация

*Keywords:* alloy metallurgy, porous materials, mechanics and instrument engineering, plasticity model, stress and strain rates, surface hardening, plastic deformation

За последние годы были разработаны различные теоретические модели для объяснения пластического поведения пористых тел. Большинство существующих моделей связывают напряженно-деформированное состояние главным образом с изменением пористости и недостаточно учитывают деформационное упрочнение основания материала. Это затрудняет выбор оптимальных параметров процессов упрочнения путем поверхностной пластической деформации и ограничивает их практическое применение. Однако упрочнение пористого тела определяется не только уменьшением пористости, но и пластическим упрочнением основания материала. Анализ исследований показывает, что механизмы поверхностного упрочнения монолитных материалов при сдвиговой обработке и пластической деформации изучены достаточно глубоко. Однако наличие пор в пористых стержневых материалах оказывает существенное влияние на ход этих процессов, и это влияние еще не в полной мере оценено с научно-технической точки зрения. В связи с этим изучение механизмов и закономерностей поверхностного упрочнения пористых стержней при пластической деформации имеет большое научное и практическое значение. Успешное применение и эффективная эксплуатация в промышленности новых классов материалов, полученных методами спекания, зависит от всестороннего изучения их технологических свойств. Экспериментальные и теоретические исследования, проведенные учеными из разных стран, показывают, что в настоящее время процесс формирования деталей и поверхностных полос из монолитных материалов в результате резки и пластической деформации можно считать достаточно изученным. Однако процесс упрочнения пористых спекаемых материалов еще недостаточно изучен. При этом, хотя влияние пор на процессы резки и пластической деформации неоспоримо, всесторонняя научно-техническая оценка этого эффекта не проводилась.

Результаты исследований позволяют выбрать оптимальные параметры процессов поверхностного упрочнения, сформулировать научно обоснованные рекомендации по изготовлению надежных и долговечных деталей в производственных условиях. Полученные теоретические результаты могут быть использованы для повышения прочности и износостойкости деталей из пористых литых материалов, таких как элементы тормозных и пружинных систем электровозов, а также аккумуляторные механизмы сельскохозяйственной техники. В то же время статья является полезным научно-методическим ресурсом в преподавании материаловедения, литейной металлургии и технологических процессов в высших учебных заведениях, а также в формировании практических навыков инженерно-технических кадров.

#### *Условия и методы исследований*

Поставленные в работе задачи решались на основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и производственных условиях. При выполнении

работы по оптимизации режимов поверхностного упрочнения пористых подложек с пластической деформацией полученные данные обрабатывались с использованием механических, математических и статистических методов с применением компьютерных технологий. Точность полученных результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными с использованием современного оборудования, измерительных приборов, устройств и материалов.

### *Результаты исследований*

Большинство ученых провели масштабную программу изучения возможностей и эффективности поверхностной пластической деформации (СПД) изделий, изготовленных методом динамического горячего прессования (ДГП). Например, были проведены исследования с моделированием процесса поверхностной пластической деформации прямоугольных образцов в конструкции с использованием тензометрического динамометра и адаптера. В качестве основных материалов для проведения исследований использовались высокомарганцевая аустенитная сталь 110Q13p (шлифованная), изготовленная методом ДГП, и низкоуглеродистый феррографит марки CQr 0.2. На основе результатов исследований были разработаны рекомендации для заводов по режимам усиления канавок подвески и пружинных систем электровозов и собирающих витков зерноуборочных комбайнов [13].

Было разработано специальное оборудование для обработки металлических отливок методом дорновой обработки и восстановления в той же зоне. Были рекомендованы оптимальные режимы закалки: относительное растяжение  $h = 0,02 \times 0,03$ , скорость растяжения – 7 м/мин, охлаждающая среда – сульфрезол. Однако эти исследования, проводимые учеными, посвящены только пластической деформации поверхности изделий, полученных методом ДКВ. Известно, что такие штукатурки либо не обладают пористостью, либо, поскольку они содержат небольшое количество мелких пор, механизм их пластической деформации поверхности аналогичен механизму монолитных штукатурок. Поэтому всестороннее изучение пластической деформации поверхности пористых штукатурок имеет важное научное и практическое значение. В последнее время получили широкое распространение две модели пластического поведения пористых тел. Первая группа моделей использует поверхность текучести в виде эллипса по осям гидростатического давления – интенсивности напряжений и связана с законом соотношения между этой поверхностью и увеличением деформаций и напряжений. Значения полуосей этого эллипса называются функциями пористости, которые были определены теоретически и экспериментально [1, 3, 5, 6, 9].

Второй тип моделей включает модели, в которых используются две системы армирующих поверхностей; одна из них соответствует девиаторной необратимой деформации, а другая – объемной деформации [11].

В рамках этих моделей можно рассматривать статически заданные задачи в замкнутой постановке, но при использовании закона, связанного с пересечением ребер их поверхностей, можно рассматривать более общие задачи. В обоих типах моделей текущая пористость может рассматриваться как единственный параметр, характеризующий состояние материала в текущий момент деформации.

В то же время хорошо известно, что упрочнение пористого тела обусловлено не только изменением (компенсацией) пористости, но и упрочнением материала, характеризующимся его пластической деформацией при ударе. Отрицание этого факта значительно сужает область применения обоих типов моделей, поскольку не позволяет учитывать вклад свойств основного материала в сопротивление пористого тела деформации. Это общий недостаток обеих моделей.

В этом контексте возникает вопрос о разработке новой версии модели пластического поведения пористого тела в поверхностном армировании с пластической деформацией. Эта версия может быть основана на теории квадратичных сотовых структур вязких напряжений и скоростей деформации, которая объединяет оба типа моделей и свободна от указанного недостатка [8, 9].

Наличие дефектов в виде дислокаций в кристаллической решетке ослабляет металл, но в то же время, когда этих дефектов много, он его упрочняет. Таким образом, для придания металлам высокой прочности можно использовать два метода: либо минимизировать количество дислокаций, либо резко увеличить их число [7, 10].

Обожженные материалы имеют структурные дефекты в виде пор и дислокаций, которые снижают их общую прочность. Одним из методов повышения прочности обожженных изделий является пластическая деформация поверхности. Наиболее эффективным методом упрочнения поверхности пористых деталей «резного» типа является последовательное упрочнение как их наружной, так и внутренней круговой поверхностей валиками. В ходе пошаговой прокатки и прокатки наружная и внутренняя поверхности резной детали находятся в состоянии всестороннего сжатия, контактируя с высокопрочными валиками (инструментом), и одновременно подвергаются пластической деформации с уменьшением размера крупных пор и устранением мелких пор. Микрошероховатость обрабатываемых нами поверхностей сглаживается путем удаления микровыступов и заполнения микроуглублений. Основными параметрами режима упрочнения при пластической деформации являются давление в зоне контакта ролика с матрицей, количество его проходов, подача и скорость ролика. Глубина деформированного слоя определяется давлением прокатки.

По предложенной схеме гладкие ролики, одновременно закаливаемые, подводятся к поверхности вращающейся цилиндрической пористой матрицы и деформируют ее поверхность под воздействием рабочего давления (50 МПа). Продольная подача роликов позволяет обрабатывать всю матрицу. В рабочей матрице ролик-распределитель закреплен на консольной стойке. Для обработки поверхностей матрицы методом верхней и нижней токарной обработки использовался токарный стан 1А16. В этом случае вместо режущего инструмента использовались верхний и нижний роликовые распределители.

Держатель станка обеспечивает необходимую подачу. Внутренний вальцовочный инструмент установлен на задней части заднего упора. Поскольку нагрев роликов в зоне контакта с инструментом незначителен, их охлаждение не требовалось. Для уменьшения трения между роликами и обрабатываемыми поверхностями использовалась керосиновая смазка. Поверхность обожженной детали не требует предварительной обработки перед пластической деформацией. Рабочее давление на ролики находится в диапазоне 10-50 МПа.

*Определение свойств чугуновых материалов.* Плотность и пористость образцов определяли гидростатическим методом. Образцы пропитывали маслом ХМ-6 (ТУ 38-20145-76) в вакууме с остаточным давлением 133 Па. Теоретическую плотность ( $d_k$ ) компактного материала рассчитывали как сумму произведений плотностей основных компонентов (железа и чугуна) по коэффициентам их массовой доли в составе, по данным о соответствующих компонентах. Для материала «железо-чугун»:

$$d_k = k_1 \cdot d_{Fe} + k_2 \cdot d_{\text{чугун}}, \quad (1)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты, соответствующие массовой доле компонентов в составе;  $d_{Fe}$  и  $d_{\text{чугун}}$  — теоретические плотности железа и чугуна соответственно. В соответствии с увеличением массы образцов после замачивания определили их массовую и объемную маслопоглощающую способность по следующим формулам:

$$M_{\text{кцт.}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$M_{\text{объем}} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 100\%}{(m_2 - m_3) \cdot s_m}, \quad (3)$$

где  $m_1$  — масса изделия до пропитки, г;  $m_2$  — масса изделия после пропитки маслом, г;  $m_3$  — масса изделия, взвешенная в воде после пропитки, г;  $s_m$  — плотность масла, г/см<sup>3</sup>. В ходе исследования были протестированы три образца из каждой партии. Коэффициент заполнения пор маслом определяется по следующей формуле:

$$K_M = \frac{m_2 - m_1}{s_m \cdot n \cdot V} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $K_M$  — коэффициент заполнения пор маслом;  $V$  — объем образцов, м<sup>3</sup>;  $n$  — пористость образцов, %. Коэффициент заполнения пор маслом не должен быть меньше 75-95%. Маслопоглощающая способность пропитанных образцов определялась методом взвешивания, пропитки маслом и обезжиривания образцов после приготовления. Для этого использовались аппарат Сокслета и аналитические весы BLR-200 с точностью взвешивания  $\pm 0,001$  г. Пропитанный маслом образец взвешивали, затем помещали в аппарат Сокслета и экстрагировали с использованием бензола в качестве растворителя В-70. После извлечения масла образец помещали в сушильный шкаф при температуре 100-1200 Дж на 3,6 ч для удаления паров растворителя, оставшихся в его порах. Путем повторения экстракции и сушки масло удаляли в такой степени, что разница в весе образца до и после сушки составляла до 0,1%. Затем обезжиренный и высушенный образец погружали в расплавленный парафин. После этого его сжигали для растворения парафина, прилипшего к его поверхности, и замачивали в воде. Количество масла выражалось в объемных процентах масла, поглощенного образцом. Оно определялось по следующей формуле:

$$M = \frac{m_1 - m_0}{(m_2 - m_3) \cdot d} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $M$  — количество масла, в %;  $m_0$  — масса обезжиренного образца, г-л;  $m_1$  — масса образца, пропитанного маслом, г-л;  $m_2$  — масса образца, пропитанного парафином, г-л;  $m_3$  — масса образца, пропитанного парафином в воде, г-л;  $d$  — плотность масла при комнатной температуре, г/см<sup>3</sup>.

Механические свойства определяли на призматических образцах (10x10x55 мм) и деталях. Твердость определяли на твердомере Роквелла ТК-2М по стандарту ДУИСТ 9013-59. Эта операция проводилась после двукратного запекания и пластической деформации образцов. Перед измерением их поверхности полировали наждачной бумагой М-40 на шлифовальном станке 3881. Твердость запеченных и деформированных образцов и деталей измеряли по шкале В.

Предел прочности на растяжение и относительное удлинение образцов определяли в соответствии с ДУИСТ 1497-84 методом испытаний на растяжение. Предел прочности на изгиб определяли на разрывной машине П-10 (в соответствии с ДУИСТ 1828-85), а ударную вязкость — на машине КМ-30 в соответствии с ДУИСТ 9654-78.

Микроструктуру обожженных и деформированных образцов изучали с помощью оптических микроскопов РМЕ OLYMPUS (Япония) и Neofot 21 (АДР). Первоначально образцы полировали на плоскошлифовальном станке модели 3881 наждачной бумагой с постепенно уменьшающимся размером зерна от М40 до М10. Полировку срезов проводили на полировальном станке модели 3881 В, нанося на них полировальную смесь — оксид хрома, смоченный в воде, — через войлок. После полировки образцы промывали водой, затем очищали

спиртом и высушивали фильтровальной бумагой. Микроструктуру образцов изучали травлением в 4% растворе  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте при увеличении в 100-400 раз.

Исследование химической микрогетерогенности сплавов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа марки TESLA BJ-300. С помощью сканирования были получены качественные данные о распределении элементов, а также проведен анализ распределения элементов в отдельных областях образца. Проведенный анализ показал, что методы упрочняющей обработки рабочих слоев чугуновых изделий являются чрезвычайно перспективными. Развитие исследований в этом направлении и применение результатов этих исследований позволяют значительно расширить ассортимент чугуновых изделий, используемых в машиностроении. Возможно достижение высокого технико-экономического эффекта, что обеспечивает экономию на дорогостоящих легированных чугуновых материалах.

Однако разнообразие процессов обработки под давлением и тот факт, что пластическая деформация пористых материалов имеет более сложный механизм, диктуют необходимость проведения исследований по аналитическому описанию пластичности пористого тела, учитывающего фактическую деформацию материальной основы. Кроме того, необходимо установить зависимость между напряжениями при обработке пористых материалов под давлением. Пластическая деформация пористого материала происходит за счет изменения расстояний между фиксированными точками при его обработке давлением. При этом изменяются размеры и форма материала. Ее принципиальное отличие от деформации компактных материалов, полученных прокаткой, литьем и другими методами, заключается в том, что в этом случае формование изделия происходит в результате деформации металла частиц и пор. В связи с этим к механике пористых тел могут быть применены основные положения механики всей среды. При этом необходимо учитывать предположение, что поры играют роль фазы, а под частицами материала понимаются области, содержащие поры и частицы металла [2, 3].

Соответственно, разработка пористых тел происходит в основном в механико-математическом (феноменологическом) направлении, то есть по аналогии с механикой целых сред, определяющие уравнения формулируются на основе экспериментов, а решение внешних задач приводит к изучению распределения напряжений и деформаций, поиску зависимостей между определяемыми экспериментальными характеристиками деформированного тела (плотность, предел текучести, модуль упругости, электро- и теплопроводность) и внешне контролируемые параметрами (давление, температура, начальная пористость, скорость деформации) [4].

Однако в данном случае, как правило, микромеханизм пластической деформации металлических частиц и его кинетика не рассматриваются. Тем не менее, параметры микродеформаций, которые мы определяем экспериментально, носят преимущественно качественный характер. Это объясняется тем, что физическая основа пластической деформации металла обязательно отличается от механизма деформации пор. Эксперименты показывают, что механические, технологические, физические и эксплуатационные свойства пористых материалов зависят не только от величины пористости, но и от формы и размера пор, степени совершенства межчастичного контакта, химического состава пор, состояния поверхности частиц, термомеханического воздействия на формирование изделий и т. д. Это не отражено в механико-математическом подходе. Например, в сформулированных уравнениях пластичности, функциях пористости и других аналитических выражениях эти факторы не учитываются в полной мере [5].

С другой стороны, в существующей литературе отсутствует информация о механизме пластической деформации запеченных фисташек, изготовленных из пористого состава

«железной руды» с упругопластической средой, который мы намерены создать. Поэтому всестороннее изучение явлений, происходящих в таких фисташках при воздействии на их поверхность холодной пластической деформации, имеет большое научное и практическое значение. Именно в этом контексте подход и проведение научного исследования определяют актуальность данной статьи.

#### *Обсуждение результатов исследований*

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что упрочнение пористых изделий, полученных методами легирования металлургии, путем поверхностной пластической деформации имеет сложный многофакторный механизм, принципиально отличающийся от процессов упрочнения, характерных для монолитных материалов. Эти различия обусловлены, прежде всего, активным участием пор во внутренней структуре материала при деформации и перераспределением нагрузки между основанием материала и пористой фазой.

Экспериментальные результаты показывают, что при применении методов поверхностной пластической деформации, таких как перекалка и недокалка, в поверхностном слое пористых деталей «резного» типа происходит интенсивный процесс уплотнения. Этот процесс сопровождается уменьшением размера крупных пор и частичным или полным устранением мелких пор. В результате фактическая плотность поверхностного слоя увеличивается, площадь контакта между частицами расширяется, а несущая способность материала возрастает. Этот факт также подтверждается результатами микроструктурных исследований: в деформированных образцах наблюдалась более однородная структура, уменьшенная пористость и металлические волокна, ориентированные в соответствии с направлением пластического течения. Полученные результаты доказывают, что упрочнение в процессе поверхностной пластической деформации происходит не только за счет уменьшения пористости. Параллельно происходит и пластическое упрочнение материальной базы, связанное с увеличением плотности дислокаций, их взаимодействием и формированием дислокационных структур. Этот факт еще раз подтверждает один из главных недостатков существующих моделей пластичности — неспособность учитывать упрочнение материальной базы. Результаты механических испытаний показали, что показатели твердости образцов, подвергнутых пластической деформации поверхности, значительно возрастают по сравнению с исходным запеченным состоянием. При этом наблюдалось увеличение прочности на растяжение и сохранение относительного удлинения до определенного предела, что свидетельствует о том, что баланс прочности и пластичности не был нарушен. Отсутствие резкого снижения ударной вязкости доказывает, что поверхностное упрочнение не вызвало охрупчивания и что процесс был проведен в правильно подобранных режимах. Оптимальные технологические параметры (давление контакта ролика, подача, скорость и количество проходов), определенные в ходе исследования, минимизировали риск расслоения и микротрещинообразования поверхностного слоя. Следует отметить, в частности, что наличие пор позволило материалу легче течь во время пластической деформации, что предотвратило повреждение поверхности, характерное для монолитных материалов. Этот факт указывает на потенциальные преимущества пористых стержневых материалов для пластической деформации поверхности [14].

Согласованность результатов, полученных в рамках предложенной пластической модели, с имеющимися экспериментальными данными подтверждает необходимость оценки пластического поведения пористого тела как с точки зрения изменения пористости, так и упрочнения материальной основы. Такой подход создает более адекватную теоретическую

основу для научного обоснования и оптимизации процессов пластической деформации поверхности. В целом, обсуждение результатов исследований показывает, что упрочнение пористых композитных материалов путем поверхностной пластической деформации — это процесс, требующий комплексного подхода не только с технологической, но и с теоретической точки зрения. Полученные результаты создают реальную основу для восполнения существующих научных пробелов в этой области, разработки новых упругопластических моделей и расширения возможностей применения пористых изделий в машиностроении.

В заключении следует отметить, что проведенные исследования показывают, что упрочнение пористых изделий, полученных методами легирования, путем поверхностной пластической деформации является одним из наиболее перспективных технологических направлений целенаправленного улучшения их физико-механических и триботехнических свойств. Процесс упрочнения в пористых материалах не ограничивается только уменьшением пористости, но также сопровождается пластическим упрочнением материальной основы, упрочнением межчастичных контактов и перестройкой микроструктуры. Учет этих особенностей позволяет научно обосновать контроль процессов поверхностного упрочнения [12].

Представленный теоретический анализ и экспериментальные результаты доказывают, что существующие модели пластичности не в полной мере отражают реальный механизм деформации пористого тела, и их применение ограничено. В этом отношении более адекватным является подход, оценивающий пластическое поведение пористых тел с точки зрения как изменения пористости, так и упрочнения материальной основы, и создающий надежную теоретическую базу для оптимизации процессов пластической деформации поверхности.

Результаты экспериментальных исследований показали, что применение методов поверхностной пластической деформации, таких как поверхностная и внутренняя прокатка, приводит к уменьшению размера пор в поверхностном слое пористых деталей «резного» типа, устранению мелких пор, сглаживанию микровыступов и, как следствие, повышению показателей твердости, прочности и износостойкости. Выбранные оптимальные технологические режимы, помимо снижения риска расслоения и повреждения пористых поверхностей, повышают их эксплуатационную надежность.

В целом, проведенное исследование расширяет научную базу упрочнения пористых композитных материалов путем поверхностной пластической деформации, частично устраняет существующие теоретические пробелы в этой области и указывает направление развития новых упругопластических моделей. Полученные результаты создают условия для расширения сферы применения пористых изделий в машиностроении и приборостроении, позволяя экономить дорогостоящие сплавы и достигать высокой технико-экономической эффективности. Одновременно статья служит методологической основой для будущих исследований, закладывая фундамент для более глубокого изучения механизмов пластической деформации пористых материалов.

#### *Список литературы:*

1. Мамедов А. Т., Джафарова С. А. Влияние температуры спекания на свойства образцов из частично легированного порошка на основе железа марки ультрапак // Ученые записки АзТУ. 2007. №3. С. 41-42.
2. Голего Н. Л., Алябиев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг - коррозия. Киев: Техника, 1994. 286 с.

3. Danninger H., Calderon R. D. O., Gierl-Mayer C. Powder metallurgy and sintered materials // *Addit. Manuf.* 2017. V. 19. №4. [https://doi.org/10.1002/14356007.a22\\_105.pub2](https://doi.org/10.1002/14356007.a22_105.pub2)
4. Ломакин Е. В., Федулов Б. Н. Растяжение полосы, ослабленной вырезами с круговым основанием, в условиях плоской деформации из материала с зависящими от вида напряженного состояния свойствами // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела.* 2013. №4. С. 80-87.
5. Петров А. К. Свойства заготовок из быстрорежущей стали, изготовленных методом горячей экструзии распыленного порошка // *Порошковая металлургия.* 2008. №1/2. С. 23-24.
6. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis of rock and concrete // *Quart. Appl. Math.* 1952. V. 10. P. 157-175.
7. Kieffer R., Hotoz W. *Pulvermetallurgie und Sinterwerkstoffe.* Springer-verlag, 2013.
8. Шведков Е. Л. Самосмазывающиеся антифрикционные материалы // *Порошковая металлургия.* 1983. Т. 6. С. 37-51.
9. Рычков Б. А., Паняев В. А., Гончарова И. В. Упругость и неупругость серого чугуна // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета.* 2012. Т. 12. №10. С. 70-75.
10. Федулов Б. Н., Сафонов А. А., Кантор М. М., Ломов С. В. Моделирование отверждения термопластических композитов и оценка величин остаточных напряжений // *Композиты и наноструктуры.* 2017. Т. 9. №2. С. 102-122.
11. Henrion J., Rhead G. E. LEED studies of the first stages of deposition and melting of lead on low index faces of copper // *Surface Science.* 1972. V. 29. №1. P. 20-36. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(72\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0039-6028(72)90069-6)
12. Kuczynski G. C. Self-diffusion in sintering of metallic particles // *Sintering key papers.* – Dordrecht : Springer Netherlands, 1990. P. 509-527. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-0741-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0741-6_33)
13. Rafieazad M., Chatterjee A., Nasiri A. M. Effects of Recycled Powder on Solidification Defects, Microstructure, and Corrosion Properties of DMLS Fabricated AlSi10Mg: Rafieazad, Chatterjee, and Nasiri // *Jom.* 2019. V. 71. №9. P. 3241-3252. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03552-2>
14. Banabic D. Plastic behaviour of sheet metal // *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. P. 27-140. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1_2)

#### References:

1. Mamedov, A. T., & Dzhaferova, S. A. (2007). Vliyanie temperatury spekaniya na svoistva obraztsov iz chastichno legirovannogo poroshka na osnove zheleza marki ul'trapak. *Uchennye zapiski AzTU.* (3), 41-42. (in Russian).
2. Golego, N. L., Alyabiev, A. Ya., & Shevelya, V. V. (1994). Freting - korroziya. Kiev. (in Russian).
3. Danninger, H., Calderon, R. D. O., & Gierl-Mayer, C. (2017). Powder metallurgy and sintered materials. *Addit. Manuf.*, 19(4). [https://doi.org/10.1002/14356007.a22\\_105.pub2](https://doi.org/10.1002/14356007.a22_105.pub2)
4. Lomakin, E. V., & Fedulov, B. N. (2013). Rastyazhenie polosity, oslablennoi vyrezami s krugovym osnovaniem, v usloviyakh ploskoi deformatsii iz materiala s zavisyashchimi ot vida napryazhennogo sostoyaniya svoistvami. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela.* (4), 80-87. (in Russian).
5. Petrov, A. K., Skorniyakov, Yu. N., & Parabina, G. I. (1980). Svoistva zagotovok iz bystrorezhushchei stali, izgotovlennoi metodom goryachei ekstruzii raspylennogo poroshka. *Poroshkovaya metallurgiya.* (9), 23-24. (in Russian).

6. Drucker, D. C., & Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis of rock and concrete. *Quart. Appl. Math*, 10, 157-175.
7. Kieffer, R., & Hotop, W. (2013). *Pulvermetallurgie und Sinterwerkstoffe*. Springer-verlag.
8. Shvedkov, E. L. (1983). Samosmazhivayushchiesya antifriktsionnye materialy. *Poroshkovaya metallurgiya*, 6, 37-51. (in Russian).
9. Rychkov, B. A., Panyaev, V. A., & Goncharova, I. V. (2012). Uprugost' i neuprugost' serogo chuguna. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta*, 12(10), 70-75. (in Russian).
10. Fedulov, B. N., Safonov, A. A., Kantor, M. M., & Lomov, S. V. (2017). Modelirovanie otverzheniya termoplasticheskikh kompozitov i otsenka velichin ostatochnykh napryazhenii. *Kompozity i nanostruktury*, 9(2), 102-122. (in Russian).
11. Henrion, J., & Rhead, G. E. (1972). LEED studies of the first stages of deposition and melting of lead on low index faces of copper. *Surface Science*, 29(1), 20-36. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(72\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0039-6028(72)90069-6)
12. Kuczynski, G. C. (1990). Self-diffusion in sintering of metallic particles. In *Sintering key papers* (pp. 509-527). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-0741-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0741-6_33)
13. Rafieazad, M., Chatterjee, A., & Nasiri, A. M. (2019). Effects of Recycled Powder on Solidification Defects, Microstructure, and Corrosion Properties of DMLS Fabricated AlSi10Mg: Rafieazad, Chatterjee, and Nasiri. *Jom*, 71(9), 3241-3252. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03552-2>
14. Banabic, D. (2010). Plastic behaviour of sheet metal. In *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation* (pp. 27-140). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1_2)

Поступила в редакцию  
21.01.2026 г.

Принята к публикации  
29.01.2026 г.

---

Ссылка для цитирования:

Гасанова С. М. Закономерности упрочнения поверхности пористых изделий при пластической деформации // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №3. С. 101-110. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/10>

Cite as (APA):

Gasanova, S. (2026). Mechanisms Governing Surface Hardening of Porous Components During Plastic Deformation. *Bulletin of Science and Practice*, 12(3), 101-110. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/10>