

УДК 004.032.26:659.148

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/119/11>

ОСОБЕННОСТИ УПЛОТНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА С УПРУГОПЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

©Хасенова С. М., ORCID: 0009-0000-4392-7672, Ph.D., Азербайджанский
кооперативный университет, г. Баку, Азербайджан, sewramgasanova@mail.ru

FEATURES OF SEALING A PIPELINE WITH AN ELASTIC-PLASTIC MEDIUM

©Hasanova S., ORCID: 0009-0000-4392-7672, Ph.D.,
Azerbaijan Cooperative University, Baku, Azerbaijan, sewramgasanova@mail.ru

Аннотация. Поставленная в работе задача решена на основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и производственных условиях. При выполнении работ по оптимизации режимов поверхностного армирования пористых подложек пластической деформацией использовались механико-математические и статистические методы обработки полученных данных с использованием вычислительной техники. Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными с использованием современного оборудования, средств измерений, приборов и расходных материалов. Предложена пластическая модель пористого тела, основанная на концепции вязких напряжений и среднеквадратических скоростей деформаций, которая обладает следующими свойствами: а) существует поверхность нагружения; б) существует поверхность текучести; в) потенциал напряжений совпадает с нагрузкой; г) диссипативная функция имеет первый порядок однородности по компонентам скоростей деформаций. Изучение кинематических параметров пористой подложки как целостной среды включает понятия макро- и микродеформации, что позволяет определить ее деформированное состояние и дифференцировать деформацию частиц и пор материала. Физико-механические и триботехнические характеристики пористого раствора определяются с учетом параметров поверхностного армирования пористого раствора пластической деформацией и деформационного упрочнения основного материала. Между ними установились взаимные отношения.

Abstract. The problem posed in the work is solved based on theoretical and experimental studies conducted in laboratory and industrial conditions. In the work on optimization of the modes of surface reinforcement of porous substrates by plastic deformation, mechanical, mathematical and statistical methods of processing the obtained data using computer technology were used. The reliability of the obtained results is confirmed by experimental studies conducted using modern equipment, measuring instruments, devices and consumables. A plastic model of a porous body is proposed, based on the concept of viscous stresses and root-mean-square strain rates, which has the following properties: a) there is a loading surface; b) there is a yield surface; c) the stress potential coincides with the load; d) the dissipative function has the first order of homogeneity in terms of the components of strain rates. The study of the kinematic parameters of a porous substrate as an integral medium includes the concepts of macro- and microdeformation, which makes it possible to determine its deformed state and differentiate the deformation of particles and pores of the material. The physical, mechanical and tribological characteristics of the porous solution are determined taking into account the parameters of the surface reinforcement of the porous solution by plastic

deformation and the strain hardening of the base material. A mutual relationship has been established between them.

Ключевые слова: состав, наполнитель, механизм уплотнения, пластик, прессование.

Keywords: composition, filler, compaction mechanism, plastic, pressing.

Разработано специальное оборудование, позволяющее осуществлять обработку отливок методом обточки и редуцирования в одной зоне. Рекомендованы оптимальные режимы упрочнения: относительное натяжение $h=0,02\div0,03$, скорость протягивания — 7 м/мин, охлаждающая среда — сульфресол. Поскольку в глинах имеются мелкие поры, механизм их поверхностной пластической деформации аналогичен механизму монолитных глин. Поэтому комплексное изучение поверхностной пластической деформации пористых глин имеет важное научное и практическое значение. В последнее время получили распространение две модели пластического поведения пористых тел. Первая группа моделей использует эллипсоидную форму поверхности текучести на осях гидростатического давления и интенсивности напряжений и связана с законом связи этой поверхности с нарастанием деформаций и напряжений. Ко второму типу относятся модели, в которых применяются две системы поверхностей армирования, одна из которых — девиаторная необратимая деформация. Одна соответствует упругости, другая — объёмной деформации. В рамках этих моделей возможно рассмотрение статически заданных задач в замкнутой постановке, но более общие задачи могут быть рассмотрены с использованием закона, связанного с рёбрами поперечного сечения поверхностей. В обоих типах моделей текущая пористость может быть принята в качестве единственного параметра, характеризующего состояние материала в текущий момент деформации. Однако хорошо известно, что пористое тело — это твердое тело. Восстановлению способствует не только изменение (ликвидация) пористости, но и упрочнение материала, обусловленное его пластической деформацией при ударе. В связи с этим возникает вопрос о разработке новой версии модели пластического поведения пористого тела при поверхностном армировании пластической деформацией, основанной на теории квадратичных сот вязких напряжений и скоростей деформаций, объединяющей оба типа моделей и лишенной указанного недостатка [1].

Цель и задачи исследования заключается в создании пористых композиционных материалов типа «железо» с упругопластической средой и упрочнении поверхности полученных из них пористых пластин методом пластической деформации.

В соответствии с поставленной целью работы были сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. синтез обожженной пористой «чугунной» композиции с упругопластической средой с использованием отходов опилок чугуна;
2. разработка пластической модели пористого тела на основе концепции среднеквадратических вязких напряжений и скоростей деформаций;
3. установить качественную и количественную связь между микродеформациями (микродеформациями) и макродеформациями, изучить закономерности деформирования обожженных частиц растворов при различных схемах нагружения и найти пути создания теории пластичности на основе физических и механико-математических методов;
4. исследование физико-механических и триботехнических характеристик обожженных материалов после поверхностного упрочнения различными видами пластической деформации;

5. разработка обоснованных рекомендаций, обеспечивающих использование результатов исследований при производстве различных видов литых деталей.

Поставленные в работе задачи решены на основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и производственных условиях. При выполнении работ по оптимизации режимов поверхностного армирования пористых подложек пластической деформацией полученные данные обрабатывались механическими, математическими и статистическими методами с использованием вычислительной техники.

Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными с использованием современного оборудования, средств измерений, приборов и расходных материалов. Образование истинной физической адгезии между соприкасающимися частицами жидкости объясняется известными свойствами жидкости [2].

При прессовании в жидкой фазе на соответствующих выступах при контакте возникают изолированные области (квазирасплавы), в которых происходит повышение давления примерно на 1-10 МПа за счет уменьшения диаметра расплава. Сплошной слой квазитвердого тела отражает источник капиллярного давления, а также считается наиболее благоприятной средой для взаимного скольжения фаз и изменения плотности частиц до состояния наиболее плотной насыпной плотности, которое исследователи называют нулевой стадией приготовления. При относительной плотности = 0,7-0,8 структурные элементы пористого тела теряют свою самостоятельность, процесс уплотнения существенно ослабевает и в конечном итоге — это происходит по известным и общепринятым схемам. Влияние поверхностной энергии на температуру плавления малых частиц было впервые обнаружено Павловым в 1908 г. По его оценке, понижение температуры плавления обратно пропорционально диаметру частиц. Экспериментально установлено понижение температуры плавления дисперсных металлических частиц [3]. Это явление характерно и для органических соединений. Приводятся примеры плавления ультрадисперсных частиц серебра и меди при температурах на 4000 Дж ниже нормальной температуры плавления. Аналогичное явление наблюдалось также в тончайших слоях висмута и олова с зернистой структурой [4].

Основываясь на термодинамических законах выведена формула для понижения температуры плавления [5]:

$$T_{(r)} = T_n \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \gamma \Omega}{q \cdot r}\right), \quad (1)$$

здесь $T_{(r)}$ и T_n — соответственно температура плавления частиц с радиусом r и номинальная температура плавления частиц сыпучего материала при атмосферном давлении. γ — поверхностная энергия твердой фазы и границы раздела сплава, Ω — атомный объем твердой фазы, q — теплота плавления на один атом [6]. Следующая формула показывает избыточное сжимающее давление Лапласа (P) на единицу объема твердой фазы под выступающей поверхностью с радиусом изгиба r , контактирующей с определенным сплавом:

$$P = \frac{2 \cdot \chi}{r} \quad (2)$$

Отсюда видно, что результат, полученный из (1) можно переписать следующим образом:

$$T_{(p)} = T_n \cdot \exp \left[-\frac{\Omega}{q} \cdot p \right] \quad (3)$$

Если обобщить сжимающее давление Лапласа выпуклой поверхности на эквивалентное механическое давление плоской поверхности, то уравнение (3) приводит к спорному результату, свидетельствующему о том, что при температурах ниже номинальной температуры плавления сжатые участки поверхности твёрдого расплава противоречат этому и согласуются с обычным увеличением молярного объёма сплава по сравнению с молярным объёмом твёрдой фазы; сжатые твердые тела плавятся при температурах выше их номинальной точки плавления. В результате трения плавление физической системы приводит к переходу из теплового состояния с более высоким содержанием в фазу с более низким содержанием. Деконтенсивность твердого кристалла измеряется по концентрации вакансий. С повышением температуры кристалла при атмосферном давлении концентрация вакансий экспоненциально возрастает таким образом, что накопленные при температуре плавления дефекты создают диэлектрический переход в виде скачка из количества в качество, известного в термодинамике как «фазовый переход первого рода». Если же учесть возможность изменения другой термодинамической переменной (давления), то равновесная концентрация вакансий в твердом кристалле можно выразить следующей формулой:

$$\xi(T_1 P) = \xi_0 \cdot \exp \left[-\frac{\Omega}{k \cdot T} \cdot p \right] \quad (4)$$

здесь ξ_0 — равновесная концентрация вакансий при комнатной температуре и атмосферном давлении, K — постоянная Больсмана, T — абсолютная температура, P — избыток атмосферного давления. Любой объект, независимо от того, получен ли он путем варки или прессования, обрабатывается одинаково, исходя из «кризисного разреза», который определяется следующим физическим соотношением [6]:

$$\alpha = \frac{E}{E_0} \quad (5)$$

где E и E_0 — соответствующие модули упругости пористого тела и компактного образца из того же материала. Критическое сечение пористого тела всегда меньше геометрического «контактного сечения», которое зависит от относительной плотности тела (v) равно. С физической точки зрения, критическое сечение описывает ту часть сечения контакта, в которой осуществляется фактическая физическая связь между атомами контактирующих частиц. Под физической связью понимаются те структурные мостики между частицами, благодаря которым физические процессы протекают так же, как в компактных образцах данного материала. Под этим термином понимаются электронные межатомные связи и полагается, что они образуются на основе туннелирования валентных электронов через потенциальные барьеры, вызванные компенсацией поверхностных атомов соседних частиц, влиянием рабочей среды, добавок и т. д. [7].

Эти две интерполяции касаются двух различных этапов четко понимаемой концепции. Уплотнённые квазисплавы образуются в небольшом числе отдельных жидких зон, так что лишь небольшие участки подъёма на большой контактной поверхности могут достичь

высокой степени уплотнения, достаточной для неравновесного плавления. Именно к этим контактными участкам физически можно отнести участок Балшина. Степень уплотнения, необходимая для образования квазисплава при комнатной температуре ($T = 300 \text{ K}$), количественно определяется путём перестановки соотношения (3):

$$P = \frac{q}{\Omega} \cdot \ln \frac{T_n}{T_{(P)}} \quad (6)$$

Если использовать стандартные значения для большинства металлов, то можно рассчитать экзотические значения 1–10 МПа. Они могут совпадать с прочностью металлов, а в технике высоких давлений такие сжатия также должны быть достигнуты с учётом сильного уменьшения рабочего сечения. Частицы как будто плавают в своих границах и в данном случае вращаются независимо друг относительно друга [8-11].

Экспериментально установлено, что нулевая стадия отжига молибдена заканчивается при относительной плотности пористых тел, равной 0,7–0,8. При этих значениях плотности достигается плотное заполнение дисперсной системы. При этих значениях плотности система теряет свою «автономность», поскольку контакты между частицами фиксируются, и процесс уплотнения существенно ослабевает. Можно рассчитать, что независимо от толщины когерентный слой квазисплава создает между частицами следующее растягивающее напряжение радиусом R :

$$P = 2.14 \frac{2\alpha}{R} \quad (7)$$

здесь α — поверхностное натяжение сплава. Как и в классических моделях, это давление вызывает процесс диффузии вакансий, что может привести к росту контактных дуг на первом этапе обжига, а затем к некоторому ослаблению уплотнения. Отчеты о диффузии вакансий по алгоритму прогрессии вязкости Френкеля или Кучинского приводят к кинетическим выражениям, которые отличаются от широко известных только числовым коэффициентом [12].

Эффект квазиплавления на поздних стадиях приготовления можно игнорировать. Рассмотренный с помощью концепции квазиплавления механизм даёт однозначный ответ на вопрос о формировании реального физического сцепления между частицами пористого тела. Исходя из представления о том, что мы постоянно представляем себе полосу поверхности жидкости, выведена приемлемая модель дисперсной системы, в которой предполагается, что физические контакты между частицами возникают в момент квазиплавления, происходящего под действием сжатия или нагрева, вплоть до элементарных выступов твёрдой поверхности. Идея квазиконденсации не отрицает привычную схему деления процесса уплотнения частиц на три стадии, а лишь предполагает ее логическое продолжение. Таким образом, прессование и варку следует рассматривать как «общий знаменатель» для их объединения в единый унифицированный механизм прессования. Очевидно, что процесс уплотнения материалов сложного состава не может быть полностью объяснен описанным выше механизмом. В таких случаях варка может происходить как с участием жидкой, так и твердой фазы одновременно. Новые требования к качеству материалов и изделий ставят перед материаловедением задачу применения дополнительных высокоэффективных методов повышения качества рабочих поверхностей изделий. Наиболее применимым из таких методов может быть пластическая деформация спеченных фисташек. Проведено теоретическое исследование процесса упрочнения поверхности железных композиций пластической деформацией. Установлено,

что функция пластичности композиционных материалов при пластической деформации зависит от первого инварианта тензора напряжений, но интенсивность этой зависимости оценивается углом внутреннего трения и определяется величиной снижения прочностных свойств компонентов, входящих в состав композиционного материала, площадью распределения свойств в единице объема композита, а также взаимной ориентацией поверхностей распределения свойств и скольжения.

Список литературы:

1. 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)
2. 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
3. Moore W. L. *Bulletin*. US Government Printing Office, 1911. V. 3.
4. Nabarro F. R. Report of a Conference on the Strength of Solids // *The Physical Society*, London. 1948. P. 75.
5. Grant N. J. Rapid solidification of metallic particulates // *JOM*. 1983. V. 35. №1. P. 20-27. <https://doi.org/10.1007/BF03338180>
6. Rafieazad M., Chatterjee A., Nasiri A. M. Effects of Recycled Powder on Solidification Defects, Microstructure, and Corrosion Properties of DMLS Fabricated AlSi10Mg // *JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*. 2019. V. 71. №9. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03552-2>
7. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972. 335 с.
8. Гегузин Я. И. Физика спекания. М.: Наука, 1967. 240 с.
9. Могучий Л. Н. Обработка давлением труднодеформируемых материалов. М.: Машиностроение, 1976. 260 с.
10. Самсонов Г. В., Плотник С. Я. Производство железного порошка. М.: Металлургия, 1977. 268 с.
11. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания. Киев: Наук. думка, 1972. 148 с.
12. Солнцев Ю. П., Веселов В. А., Демянцевич В. П. Металловедение и технология металлов. М.: Металлургия, 1988. 512 с.

References:

1. 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)
2. 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
3. Moore, W. L. (1911). *Bulletin* (Vol. 3). US Government Printing Office.
4. Nabarro, F. R. (1948). Report of a Conference on the Strength of Solids. *The Physical Society, London*, 75.
5. Grant, N. J. (1983). Rapid solidification of metallic particulates. *JOM*, 35(1), 20-27. <https://doi.org/10.1007/BF03338180>

6. Rafieazad, M., Chatterjee, A., & Nasiri, A. M. (2019). Effects of Recycled Powder on Solidification Defects, Microstructure, and Corrosion Properties of DMLS Fabricated AlSi10Mg. *JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 71(9). <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03552-2>
7. Bal'shin, M. Yu. (1972). *Nauchnye osnovy poroshkovo metallurgii i metallurgii volokna*. Moscow. (in Russian).
8. Geguzin, Ya. I. (1967). *Fizika spekaniya*. Moscow. (in Russian).
9. Moguchii, L. N. (1976). *Obrabotka davleniem trudnodeformiruemyykh materialov*. Moscow. (in Russian).
10. Samsonov, G. V., & Plotnik, S. Ya. (1977). *Proizvodstvo zheleznogo poroshka*. Moscow. (in Russian).
11. Skorokhod, V. V. (1972). *Reologicheskie osnovy teorii spekaniya*. Kiev. (in Russian).
12. Solntsev, Yu. P., Veselov, V. A., & Demyantsevich, V. P. (1988). *Metallovedenie i tekhnologiya metallov*. Moscow. (in Russian).

Поступила в редакцию
15.09.2025 г.

Принята к публикации
23.09.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Хасенова С. М. Особенности уплотнения трубопровода с упругопластичной средой // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №10. С. 83-89. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/119/11>

Cite as (APA):

Hasanova, S. (2025). Features of Sealing a Pipeline with an Elastic-Plastic Medium. *Bulletin of Science and Practice*, 11(10), 83-89. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/119/11>