



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Зависимость газовой пористости металлополимера от вакуума при вибровакuumной дегазации в металл-композитной технологии инструментальных корпусов

Николай Любимый ^a, Андрей Польшин ^b, Борис Четвериков ^{c, *}, Владислав Прокопенко ^d,
Ардалион Мальцев ^e, Михаил Быценко ^f

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, 308012, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6131-3217>,  nsclubim@bk.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>,  info@polshin.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>,  await_rescue@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-7120-1411>,  vlad.prokopenko1@yandex.ru;
^e  <https://orcid.org/0000-0002-0878-3658>,  ardalion_bgtnu@mail.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0004-2133-885X>,  b.michutka2005@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.02:678.067

История статьи:

Поступила: 02 февраля 2026
Рецензирование: 12 февраля 2026
Принята к печати: 14 марта 2026
Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Металл-композитная технология
Металлополимерный
композиционный материал
Вибровакuumная дегазация
Газовая пористость
SLM-оболочка

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-10022, <https://rscf.ru/project/23-79-10022/>.

Благодарности

Исследование выполнено с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

АННОТАЦИЯ

Введение. Металл-композитная технология (МКТ) изготовления инструментальных корпусов по схеме «SLM-оболочка + металлополимерный композиционный материал (металлополимер/МПКМ)» позволяет реализовывать криволинейные каналы подачи СОТС и снижать аддитивный объем металла, однако качество заполнения тонкостенных полостей в решающей степени определяется уровнем газовой пористости наполнителя. Газовая пористость ухудшает теплопроводность и несущую способность МПКМ, снижает стабильность заполнения критических зон у стенки SLM-оболочки и вблизи каналов, что ведет к росту разброса свойств и риску дефектов при эксплуатации инструментов. **Цель работы:** экспериментально установить зависимость газовой пористости МПКМ от остаточного давления при вибровакuumной дегазации и обосновать технологически предпочтительный диапазон вакуума для применения в МКТ-корпусах режущего инструмента. **Метод и методология.** Исследование выполнено на вибровакuumной установке, включающей в себя камеру предварительной дегазации и камеру заливки с низкочастотной вибрацией. Для каждого режима вакуума изготавливались типовые образцы МПКМ. Пористость оценивалась по принятой балльной шкале на основе микроскопии (анализ распределения пор, кластерности и характерных размеров дефектов). **Результаты и обсуждение.** Эксперимент показал устойчивую нелинейную (V-образную) закономерность: при снижении давления от атмосферного до области примерно 450 Па средняя пористость монотонно уменьшается, достигая минимума в диапазоне 400...350 Па (уровень 1...2 балла), тогда как при дальнейшем углублении вакуума ниже 300 Па наблюдается переход к интенсивному газовыделению и вспениванию («закипанию») с резким ростом дефектности (до 3...5 баллов). **Выводы.** Установленный оптимальный диапазон 400...350 Па рекомендован как компромисс между эффективным удалением вовлеченного газа и исключением режима вспенивания, что обеспечивает воспроизводимое качество заполнения полостей SLM-оболочек МПКМ в технологии МКТ инструментальных корпусов.

Для цитирования: Зависимость газовой пористости металлополимера от вакуума при вибровакuumной дегазации в металл-композитной технологии инструментальных корпусов / Н.С. Любимый, А.А. Польшин, Б.С. Четвериков, В.С. Прокопенко, А.К. Мальцев, М.В. Быценко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 6–31. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-6-31.

Введение

В инструментальном производстве все более востребованы конструкции корпусных деталей с функционально интегрированными внутренними каналами подачи смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), позволяющими

*Адрес для переписки

Четвериков Борис Сергеевич, к.т.н., доцент
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова,
ул. Костюкова, д. 46,
308012, г. Белгород, Россия
Тел.: +7 951 134-32-43, e-mail: await_rescue@mail.ru

ми улучшать тепловой режим и стабильность резания. Наиболее перспективным подходом для реализации каналов сложной пространственной геометрии является аддитивное изготовление (SLM и родственные процессы), обеспечивающее криволинейные каналы, плавные переходы сечений и ориентацию потоков к функциональным зонам режущей части [1–3].

Однако цельнометаллическое аддитивное изготовление корпусов режущего инструмента часто оказывается экономически нецелесообразным из-за роста объема построения и постобработки. Поэтому практический интерес представляют гибридные решения, в которых аддитивная часть выполняется в виде тонкостенной SLM-оболочки, формирующей посадочные и базовые поверхности, а также каналы СОТС, тогда как внутренний объем заполняется металлополимерным композиционным материалом (МПКМ). Такая схема «SLM-оболочка + МПКМ» относится к металл-композитной технологии (МКТ) и позволяет снижать аддитивный объем металла при сохранении функциональности оболочки.

Качество заполнения внутренних полостей SLM-оболочек во многом определяется газовой пористостью МПКМ (рис. 1), возникающей вследствие вовлечения воздуха при приготовлении и заливке вязкой наполненной композиции. Поры ухудшают эффективную теплопроводность композита [4] и могут снижать несущую способность заполнителя, особенно критичны дефекты в зоне контакта «оболочка – МПКМ» и вблизи каналов СОТС. Поэтому дегазация МПКМ является обязательной стадией технологического маршрута МКТ-корпусов и должна рассматриваться не абстрактно, а через критерии пригодности для инструментальных корпусов (допустимый уровень пористости и отсутствие крупных дефектов в критических зонах). В ранних исследованиях отмечено, что образцы, отвержденные при атмосферном давлении, демонстрируют микроскопические дефекты (до миллиметровых размеров), тогда как вакуумирование позволяет практически исключить видимые поры [5].

Вакуумирование и дегазация широко применяются в технологиях композитного производства, и в ряде работ показано, что эффективность удаления вовлеченных/растворенных газов существенно зависит от уровня остаточ-

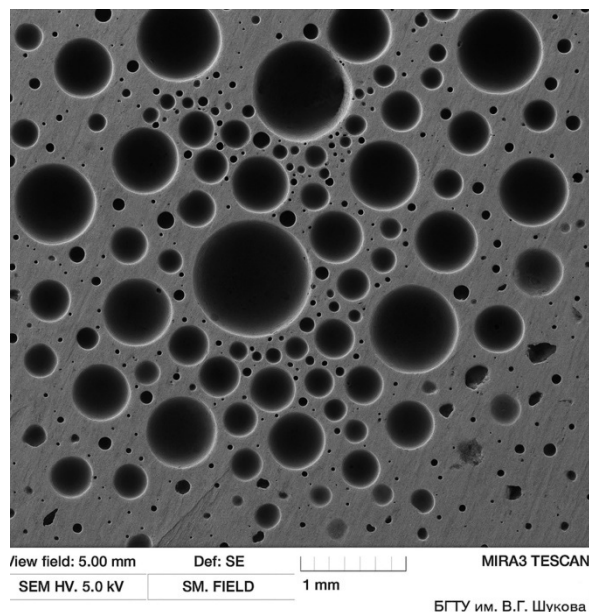


Рис. 1. Микроструктура металлополимерного образца, полученного заливкой без дегазации, давление 101 325 Па (место концентрации газовых включений)

Fig. 1. Microstructure of a metal–polymer composite sample obtained by casting without degassing, at a pressure 101,325 Pa (region of gas inclusion concentration)

ного давления [6–8]. Вместе с тем для вязких наполненных систем и для случаев заполнения замкнутых полостей сложной геометрии сохраняется практическая неопределенность: какой уровень вакуума является достаточным для снижения пористости и где проходит граница, после которой углубление вакуума может приводить к нежелательным явлениям газовой выделению и вспенивания композиции. Дополнительным технологическим инструментом служит виброассистенция, способствующая выходу пузырьков и улучшению заполняемости. Однако режимы вакуума и вибрации должны подбираться согласованно и обоснованно.

Таким образом, нерешенной задачей для металл-композитных инструментальных корпусов является экспериментально подтвержденное определение диапазона остаточного давления, обеспечивающего минимальную газовую пористость МПКМ без перехода в режим вспенивания, и формализация критериев технологической приемки.

Дополнительная сложность в случае МКТ состоит в том, что заполнение выполняется не в плоский или открытый ламинат, а во внутренние

полости оболочки сложной геометрии, где есть тонкостенные участки, узкие перемычки, протяженные каналы и локальные объемы, склонные к удержанию пузырьков. Поэтому на практике применяется комбинированное воздействие: вакуумирование + вибрационная ассистенция, повышающая текучесть и способствующая выходу пузырьков. Для процессов, близких по физике (вакуумная инфузия, формование), показано, что вибрация способна влиять на пустотность и качество пропитки. Существуют исследования, где анализируется влияние виброассистенции на пористость и прочностные характеристики композитов при вакуум-процессинге [9, 10]. Эти результаты методически важны для МКТ. Хотя материалы и геометрия отличаются, сама идея «управляемой реологии совместно с облегченной дегазацией» через вибрацию и вакуум имеет общую физическую основу.

На практике (рис. 2) установлено, что при приготовлении и транспортировании вязких наполненных МПКМ газовые включения формируются практически неизбежно (реология, пере-

мешивание, заливка), поэтому предварительная дегазация рассматривается как обязательный этап вибровакuumного процесса заполнения [11].

Одновременно показано, что параметры виброассистенции должны обеспечивать рост текучести без расслоения и вспенивания. Подобные эффекты и ограничения виброассистированного вакуум-процессинга описаны в работах [12, 13]. В рамках настоящей работы экспериментально установлен диапазон частот 40...60 Гц и амплитуд 0,2...0,6 мм как обеспечивающий минимальное время заполнения форм и пригодный для дальнейших исследований влияния вакуума на пористость.

По мнению авторов, с практической точки зрения значимость работы определяется тем, что дегазация задает «качество по умолчанию» для всей МКТ: дефекты, сформированные на стадии приготовления/дегазации МПКМ, в дальнейшем не могут быть устранены последующими операциями и проявляются как скрытая неоднородность заполнения. В инструментальных корпусах это особенно критично, потому что именно

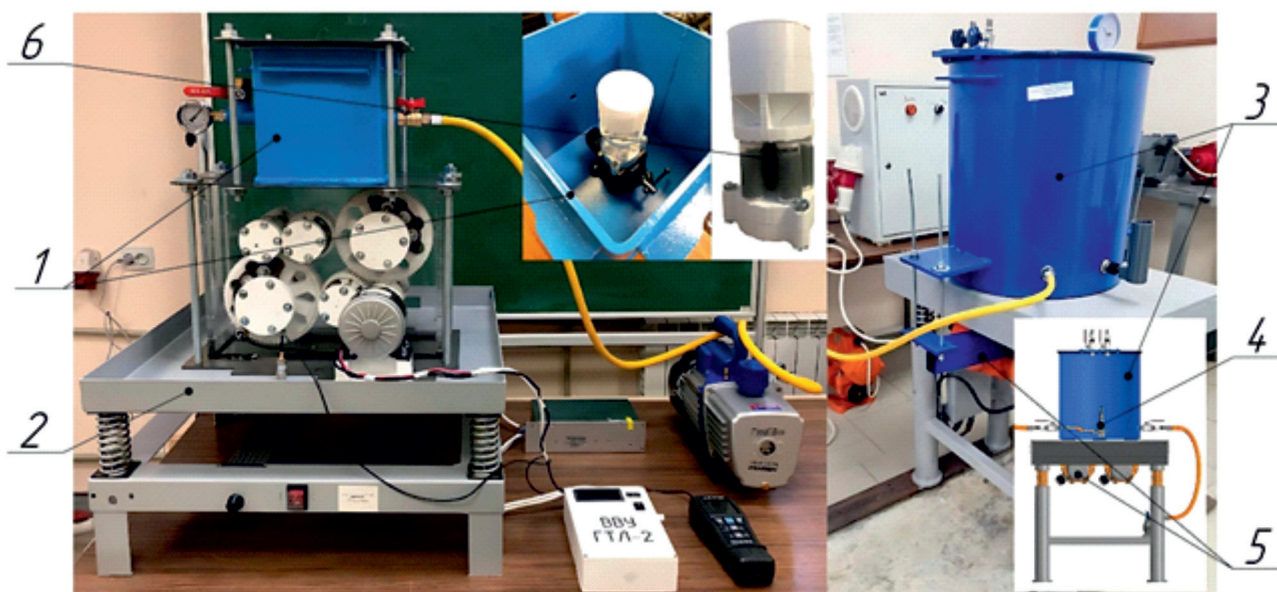


Рис. 2. Экспериментальное устройство вибровакuumного заполнения внутренних полостей SLM-оболочек МПКМ:

1 – вакуумная камера предварительной дегазации; 2 – вибростол; 3 – вакуумная камера заливки МПКМ в полости SLM-оболочек; 4 – пустотелый SLM-корпус сверла; 5 – вибраторы; 6 – обойма для получения МПКМ-образцов для исследования на пористость

Fig. 2. Experimental setup for vibro-vacuum filling of internal cavities in SLM shells with a metal-polymer composite material (MPCM):

1 – vacuum chamber for preliminary degassing; 2 – vibration table; 3 – vacuum chamber for MPCM casting into the cavities of SLM shells; 4 – hollow SLM drill body; 5 – vibrators; 6 – holder (fixture) for producing MPCM samples for porosity evaluation

качество заполнения определяет устойчивость работы композитной конструкции и повторяемость эксплуатационного эффекта.

Целью настоящей работы является экспериментальное установление зависимости газовой пористости МПКМ от остаточного давления при вибровакuumной дегазации и обоснование технологически предпочтительного диапазона вакуума для применения в МКТ-корпусах режущего инструмента с ориентацией на условия импортозамещения и мелкосерийного производства. Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

- адаптировать методику оценки пористости и критерии приемки МПКМ применительно к МКТ-корпусам;
- провести серию экспериментов при различных значениях остаточного давления с получением параллельных образцов;
- выявить закономерность «давление – пористость» и определить оптимальную и критическую области параметров, соответствующие технологическим ограничениям заполнения SLM-оболочек.

Методика исследований

Объектом исследования является металлополимер, применяемый в металл-композитной технологии (МКТ) для заполнения внутренних полостей тонкостенных SLM-оболочек инструментальных корпусов (в частности, корпусов сборных сверл с внутренними каналами подачи СОТС). Дегазация рассматривается как обязательная стадия технологического маршрута МКТ, направленная на снижение газовой пористости, стабилизацию заполнения тонкостенных зон и минимизацию дефектов вблизи стенки SLM-оболочки и рядом с каналами СОТС (критическая зона контакта «металл – МПКМ»).

Дегазация и заполнение выполнялись на специализированной вибровакuumной установке (рис. 2), обеспечивающей следующие операции:

- 1) предварительную вакуумную дегазацию МПКМ перед заливкой;
- 2) виброассистированную заливку МПКМ в полости SLM-оболочки при пониженном давлении;
- 3) получение контрольных образцов МПКМ для последующей оценки пористости в идентичных режимах.

Технологическая последовательность включала в себя подготовку специальной оснастки (рис. 3) для одновременного получения пяти образцов; приготовление МПКМ; вакуумирование и заполнение полостей оснастки при заданной величине давления с одновременным воздействием низкочастотной вибрации; выдержку и дальнейшее отверждение материала.

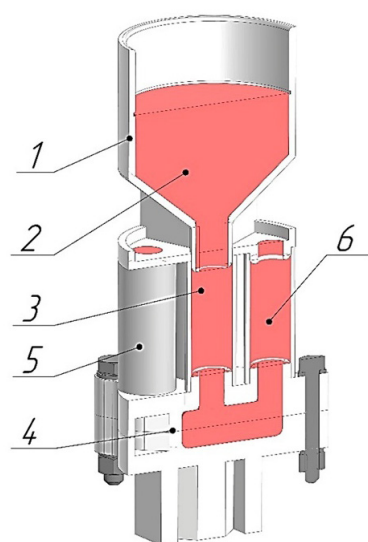
Эксперимент был направлен на установление зависимости газовой пористости МПКМ от величины применяемого вакуума при вибровакuumной дегазации. В качестве основного варьируемого фактора принято остаточное давление в вакуумной камере («уровень вакуума»).

Для исключения влияния посторонних факторов фиксировались следующие параметры:

- 1) состав МПКМ и режим его приготовления;
- 2) геометрия формы для контрольных образцов;
- 3) режим вибровоздействия (частота, амплитуда, длительность);
- 4) температурные условия процесса и выдержки.

В качестве исследуемого заполняющего материала использовали двухкомпонентный металлополимерный композиционный материал (МПКМ) «Ферро-хром» (ТУ 2257-002-48460567-00) [11]. В настоящей работе применяли активатор «желтый (жидкий)» и разбавитель производителя. Композиция относится к классу металлополимеров (базовый компонент + активатор), предназначенных для ремонтно-восстановительных операций и литейного заполнения полостей при соблюдении режимов приготовления и дегазации. Паспортные технологические и физико-механические характеристики примененного МПКМ, влияющие на условия вакуумирования и формирования пористости, приведены в табл. 1.

Детальная рецептура (массовые доли отдельных компонентов, тип связующего/отвердителя, гранулометрия наполнителя) в открытой части технической документации, доступной авторам, не раскрывается. В связи с этим в работе приведены паспортные характеристики материала и строго зафиксированы технологические условия приготовления, дегазации и отверждения (соотношение компонентов, температура, время, остаточное давление, режим вибрации), что обеспечивает воспроизводимость эксперимента на уровне технологического процесса.



а



б

Рис. 3. Оснастка для получения МПКМ-образцов для исследования балльной оценки пористости:

а – цифровая модель оснастки, где 1 – бункер, 2 – МПКМ, 3 – литник, 4 – распределитель, 5 – форма, б – МПКМ-образец; б – физическая модель оснастки с залитым МПКМ (101 325 Па)

Fig. 3. Equipment for producing MPCM samples for the porosity rating assessment:

а – digital model of the equipment, where 1 – reservoir, 2 – MPCM, 3 – sprue, 4 – distributor, 5 – mould, 6 – MPCM sample; б – physical model of the equipment filled with MPCM (101,325 Pa)

Таблица 1

Table 1

**Паспортные технологические и физико-механические характеристики МПКМ «Ферро-хром»
(по данным производителя)**

**Passport technological and physical-mechanical characteristics of Ferro-Chrome MPCM
(according to the manufacturer)**

Параметр / Parameter	Значение / Value	Примечание / Note
Удельная масса (плотность) композиции, г/см ³ / Specific gravity (density) of the composition, g/cm ³	2,5	Для активатора «желтый» / For the “yellow” activator
Жизнеспособность при (18...20) °С, мин / Pot life at (18–20) °C, min	45	Для активатора «желтый» / For the “yellow” activator
Температуростойкость по Вика, °С / Vicat heat resistance, °C	300	По данным производителя / According to manufacturer’s data
Рабочая температура, °С / Operating temperature, °C	от –120 до +170	Для активатора «желтый» / For the “yellow” activator
Время отверждения при 20 °С до механообработки, ч / Curing time at 20 °C until machining, h	3,5...4	По данным производителя / According to manufacturer’s data
Время отверждения при 20 °С до полной прочности, ч / Curing time at 20 °C until full strength, h	24	По данным производителя / According to manufacturer’s data
Твердость по Бринеллю, МПа / Brinell hardness, MPa	310	По данным производителя / According to manufacturer’s data
Предел прочности при сжатии, МПа / Compressive strength, MPa	230	По данным производителя / According to manufacturer’s data
Предел прочности при изгибе, МПа / Flexural strength, MPa	76	По данным производителя / According to manufacturer’s data

Параметр / Parameter	Значение / Value	Примечание / Note
Прочность при нормальном отрыве от стали, МПа / Adhesive strength (normal pull-off) to steel, MPa	45	По данным производителя / According to manufacturer's data
Прочность при нормальном отрыве от алюминия, МПа / Adhesive strength (normal pull-off) to aluminum, MPa	45	По данным производителя / According to manufacturer's data
Прочность при нормальном отрыве от латуни, МПа / Adhesive strength (normal pull-off) to brass, MPa	44	По данным производителя / According to manufacturer's data

Смешивание выполняли при температуре (18...20) °С. Компоненты «базис» и «активатор (желтый, жидкий)» дозировали и смешивали в соответствии с рекомендациями производителя для материала «Ферро-хром» [11] в следующих весовых пропорциях: базис 19,5 г / активатор «желтый (жидкий)» 1 г / разбавитель 1 г). Далее проводили предварительную вакуумную дегазацию согласно описанному ниже режиму.

Следует отметить, что зачастую МПКМ [11] является ремонтным материалом. Производитель рекомендует нанесение МПКМ тонкими слоями как раз из-за риска накопления газозаключений. Перемешивание компонентов рекомендуется выполнять специальной лопаткой с малой интенсивностью. Возникает технологическая сложность при приготовлении значительных объемов МПКМ, так как эффективное смешение без применения механизированных миксеров не позволит провести качественное смешивание компонентов до начала процесса полимеризации и потери текучести. Поэтому при приготовлении промышленных объемов МПКМ с целью литья использовались механические мешалки (рис. 4), вследствие чего МПКМ интенсивно насыщался газообразными включениями. В дальнейшем это будет хорошо видно на результатах микроскопии образцов, отвержденных в условиях давления, близкого к атмосферному.

Для количественной оценки газовой пористости изготавливались контрольные образцы МПКМ, полученные в режимах, идентичных заполнению SLM-оболочек. Образцы формировались в специальной обойме (поз. 5 на рис. 3), что позволяло воспроизводимо фиксировать геометрию образца; обеспечить сопоставимость условий дегазации и заливки; проводить одинаковую подготовку поверхности для микроскопии и анализа пор.



Рис. 4. Процесс механического смешивания компонентов МПКМ

Fig. 4. The process of mechanical mixing of MPCM components

Для каждого значения остаточного давления в вакуумной камере с использованием оснастки (рис. 3) одновременно изготавливалась серия из $n = 5$ параллельных образцов МПКМ. После отверждения выполнялась механическая подготовка образцов – резка и шлифование.

Методика оценки газовой пористости проводилась комбинированным способом.

1. Визуально-рейтинговая оценка. После подготовки шлифов образцов на каждом из пяти полученных образцов визуально можно было выбрать ту зону исследуемого образца, в которой имелось наибольшее количество дефектов. Как правило, это донная зона образца, где скапли-

валось наибольшее количество газовых включений, переходящих из зоны распределителя (поз. 4 рис. 3). Именно эта зона является наиболее подверженной накоплению пористости из-за специфики геометрической формы оснастки.

2. Микроскопический анализ (основной инструмент контроля). Проводилась микроскопия подготовленных поверхностей наиболее дефектной зоны (5×5 мм) с регистрацией изображений на автоэмиссионном электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU при фиксированном увеличении и одинаковых настройках освещения/контраста. Съемку выполняли в режиме регистрации вторичных электронов (SE) при ускоряющем напряжении 5,0 кВ и рабочем расстоянии $WD \approx 10$ мм. Для микрофотографий, приведенных в работе, поле зрения составляло 5,00 мм, шкала – 1 мм.

Далее выполнялась оценка доли пор по площади на выбранном поле зрения ($\%, \Sigma S_{\text{пор}} / \Sigma S_{\text{образца}}$); распределения пор по размерам (d_{max} , мм); характера пористости (одиночные поры, скопления, пористые зоны, поры у границы «оболочка – наполнитель» и др.).

Средний балл пористости для режима рас считывали по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где x_i – балл пористости i -го образца; $n = 5$.

Рассеяние оценивали через выборочное стандартное отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}, \quad (2)$$

95%-й доверительный интервал (ДИ) для среднего значения определяли по t -распределению:

$$\Delta 95 = t_{0,975, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

где $t_{0,975, n-1} = 2,776$ при $n = 5$. Значения $\bar{x}$ и $\Delta 95$ приведены в табл. 4 отдельными столбцами, а на рис. 14 показаны планки погрешностей, соответствующие $\pm \Delta 95$.

3. Была разработана балльная шкала микродефектности (табл. 2), основанная на терминологии дефектов литых материалов [14] (для унификации описания пор/раковин) и на подходах

к оценке пустотности композитов, принятых в стандартах на полимерные композиты. Балльная оценка x_i определялась для каждого из пяти образцов серии. Выбор «наиболее дефектной зоны» выполнялся в пределах каждого образца для стандартизации поля анализа 5×5 мм. Такой подход соответствует общепринятой практике оценки содержания пустот в полимерных композитах [15, 16], где пустотность рассматривается как ключевой показатель качества и стабильности технологии.

В литературе по полимерным композитам [17] отмечается, что критические уровни пустотности для приемки зависят от назначения и часто находятся в диапазоне 1–2 %, при этом для менее ответственных применений могут допускаться значения до 5 %. Границы по площади доли пор P выбраны в логике стандартного показателя пустотности для полимерных композитов. Диапазоны 0,5–1–2 % соответствуют переходу от низкой к умеренной пустотности, при которой в композитных системах начинают проявляться заметные изменения механических характеристик, тогда как значения порядка нескольких процентов рассматриваются как критические для стабильности свойств. Порог 4 % принят как консервативный браковочный уровень для исследуемой технологии изготовления металлополимерных элементов, поскольку при достижении указанного уровня наблюдается выраженная неоднородность структуры и высокая вариативность результатов.

Дополнительно введен критерий максимального эквивалентного диаметра поры D_{max} , поскольку одинаковая площадьная доля пор может соответствовать принципиально разной опасности дефектов (много мелких пор против единичной крупной полости). Для композитов показано [17], что даже около 1 % содержания пор может заметно снижать прочностные характеристики, а крупные поры являются потенциальными концентраторами напряжений и инициаторами разрушения. Поэтому пороговые уровни d_{max} используются как консервативные приемочные ограничения. Пороговые уровни d_{max} (0,30; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 мм) отражают переход от дисперсной пористости к единичным крупным полостям (раковинам), которые являются локальными концентраторами напряжений и ин-

Разработанная балльная шкала микродефектности и приемочные критерии
Developed microdefect rating scale and acceptance criteria

Количество баллов / Number of points	Пористость по площади, % ($\Sigma S_{\text{пор}} / \Sigma S_{\text{образца}}$) / Area porosity, % ($\Sigma S_{\text{por}} / \Sigma S_{\text{sample}}$)	Условия по размерам / Conditions by size	Допустимость для МКТ КС / Acceptability for MCT drill bodies
0 баллов / 0 points	Поры не выявлены, < 0,05 % / No pores detected, < 0.05%	$d_{\text{max}} < 0,30$ мм; кластеров нет / $d_{\text{max}} < 0.30$ mm; no clusters	Безусловно годен, доп. действий не требуется / Unconditionally acceptable; no additional actions required
1 балл / 1 points	0,05–0,5 %	$d_{\text{max}} \leq 0,50$ мм; кластеров нет / $d_{\text{max}} < 0.50$ mm; no clusters	Годен. Допускается только дисперсная пористость / Acceptable. Only dispersed porosity is permitted
2 балла / 2 points	0,5–1,0 %	$d_{\text{max}} \leq 1,00$ мм; кластеров нет / $d_{\text{max}} < 1.00$ mm; no clusters	Годен с контролем расположения дефектов рентгеновскими методами / Acceptable with control of defect location by radiographic methods
3 балла / 3 points	1,0–2,0 %	$d_{\text{max}} \leq 1,50$ мм; кластеры отсутствуют / $d_{\text{max}} < 1.50$ mm; no clusters	Ограниченно годен: только для опытных образцов или предсерийных испытаний. Для серийного применения негоден / Limitedly acceptable: only for prototype/pre-production trials. Not suitable for serial production
4 балла / 4 points	2,0–4,0 %	$d_{\text{max}} \leq 2,00$ мм; возможны кластеры / $d_{\text{max}} \leq 2.00$ mm; clusters possible	Негоден для эксплуатации. Допускается только для стендовых «холодных» испытаний методики. Требуется корректировка процесса (дегазация / вибрация / реология) и повторное изготовление / Unacceptable for operation. Permitted only for bench-scale “cold” method development tests. Process adjustment (degassing / vibration / rheology) and re-fabrication required
5 баллов / 5 points	> 4,0 %	$d_{\text{max}} > 2,00$ мм и/или кластеры / $d_{\text{max}} \leq 2.00$ mm and/or clusters possible	Безусловный брак. Повторное изготовление с корректировкой параметров вакуумирования и виброассистенции / Unconditional rejection. Re-fabrication with correction of vacuum parameters and vibration assistance required

дикаторами нарушения технологии заливки. Уровень $d_{\text{max}} \geq 2,0$ мм принят как браковочный в пределах поля 5×5 мм, поскольку соответствует крупному дефекту, сопоставимому по размеру с характерным масштабом зоны контроля.

Кластерность выделена как отдельный признак, поскольку локальные скопления пор типичны для режима вспенивания и технологически более опасны, чем равномерная дисперсная пористость. Кластеры приводят к локальной неоднородности свойств, особенно критичной

в зоне контакта «SLM-оболочка – МПКМ» и вблизи каналов СОТС. Кластер определяли как наличие не менее трех пор в пределах окружности радиусом 0,5 мм. Выбор радиуса обусловлен тем, что он соответствует локальному масштабу дефектной зоны (10 % размера поля 5×5 мм) и позволяет отделить равномерную дисперсную пористость от локальных очагов газонакопления. Критерий ≥ 3 пор исключает ложные срабатывания, связанные со случайным расположением единичных пор.

Пороговые значения уточнялись по результатам предварительной серии экспериментов и подбирались таким образом, чтобы обеспечивать устойчивое разделение режимов обработки по уровню дефектности при минимальном перекрытии распределений показателей P и d_{max} . Дополнительно согласованность автоматизированной оценки со шкалой подтверждена экспертной визуальной классификацией микрофотографий.

Для повышения воспроизводимости и получения десятичной оценки дефектности интегральный балл рассчитывали по трем количественным признакам, извлекаемым из микрофотографий, – площадной доле пор P , максимальному эквивалентному диаметру поры d_{max} и кластерности. Внутри интервалов применена линейная интерполяция, обеспечивающая непрерывную оценку. Кластерность определяли как долю пор, входящих в кластеры (≥ 3 поры в радиусе 0,5 мм), и переводили в балльную шкалу. Выбранные пороги обеспечивают устойчивое разделение режимов дегазации: при атмосферном давлении и при чрезмерно глубоком вакууме наблюдается рост дефектности до 4...5 баллов, тогда как в диапазоне 350...500 Па достигаются минимальные значения 1,2...1,9 балла, что подтверждается экспериментальными данными.

Для автоматизации оценки пористости по микрофотографиям было разработано программное обеспечение (ПО) на языке Python «Анализатор пористости SEM». Решение реализовано как локально запускаемое интерактивное web-приложение: вычисления выполняются на компьютере пользователя, а интерфейс отображается в браузере. Такой подход упрощает воспроизводимость методики (фиксируется набор параметров обработки) и делает инструмент

удобным для повседневной лабораторной работы (загрузка изображения, визуальная проверка маски пор, экспорт отчета).

В качестве фреймворка пользовательского интерфейса выбран Streamlit – библиотека Python для быстрого создания интерактивных приложений анализа данных без разработки отдельного фронтенда (HTML/JavaScript) и без сборки исполняемых GUI-приложений. Интерфейс формируется непосредственно из Python-кода и включает в себя элементы управления (ползунки, переключатели, поля ввода), загрузку файлов, вывод изображений и таблиц. Для задачи оценки пористости Streamlit удобен тем, что позволяет быстро настроить панель параметров обработки; сразу отображать промежуточные результаты (ROI, порог, маска, наложение); сохранять отчеты; запускать приложение локально на любом ПК, где установлен Python и зависимости.

Приложение разворачивается в изолированной среде (Anaconda/venv) под Windows 11, что снижает риск конфликтов версий библиотек и обеспечивает переносимость. Вся обработка изображений и вычисление показателей выполняются стандартными открытыми библиотеками компьютерного зрения и анализа данных. В табл. 3 приведен перечень ключевых зависимостей и их назначение в реализованном ПО.

Для исключения влияния служебных подписей или масштабной линейки фотографию предварительно обрезают до области образца. Была также предусмотрена функция программной обрезки нижней части изображения на заданную пользователем долю высоты. Масштабирование обеспечивали по измеренной калибровке. Для этого предварительно в графическом редакторе с использованием инструмента «линейка» измеряли масштабную метку 1 мм в пикселях. Затем полученное значение для конкретной фотографии вносили в поле «Калибровка», что позволяло переводить пиксельные размеры в миллиметры.

ПО реализовано в виде интерактивного окна (рис. 5) с разделением на панель управления параметрами (слева) и область визуализации результатов (справа). На панели управления пользователь пошагово задает параметры обработки изображения, а в основной области одновременно отображаются исходные и промежуточные

Программная среда и используемые библиотеки разработанного ПО для автоматизированной оценки пористости

Software environment and libraries used in the developed tool for automated porosity assessment

Компонент, библиотека / Component, Library	Назначение / Function	Роль в разработанном ПО / Use in the developed tool
Python	Язык программирования общего назначения; широко используется для научных вычислений и обработки данных / General-purpose programming language; widely used for scientific computing and data processing	Реализация полного цикла обработки: предобработка, сегментация, измерение параметров пор и расчет интегрального балла / Implements the full processing pipeline: preprocessing, segmentation, pore parameter measurement, and calculation of the integral point score
Streamlit	Фреймворк для создания интерактивных приложений анализа данных с интерфейсом в браузере / Framework for creating interactive data analysis applications with a browser-based interface	Организация пользовательского интерфейса: загрузка JPG, панель параметров (калибровка, порог, морфология, кластеризация), визуализация результатов и кнопки экспорта отчетов / Provides the user interface: JPG image upload, parameter panel (calibration, thresholding, morphology, clustering), result visualization, and report export buttons
OpenCV (cv2)	Библиотека компьютерного зрения для обработки изображений (фильтрация, контрастирование, пороговая обработка) / Computer vision library for image processing (filtering, contrast enhancement, thresholding)	Чтение изображения, перевод в оттенки серого, применение CLAHE (локальное усиление контраста), бинаризация (Otsu/Adaptive) / Handles image reading, conversion to grayscale, application of CLAHE (local contrast enhancement), and binarization (Otsu/adaptive)
scikit-image (skimage.measure, skimage.morphology)	Набор алгоритмов анализа изображений и морфологической обработки; инструменты для работы со связными областями / Collection of image analysis and morphological processing algorithms; tools for working with connected components	Маркировка связных компонент (поры), расчет геометрических признаков (area, centroid, equivalent diameter), очистка маски (remove_small_objects, closing/opening) / Performs connected component labeling (pores), calculation of geometric features (area, centroid, equivalent diameter), and mask cleaning (remove_small_objects, closing/opening)
scikit-learn (DBSCAN)	Библиотека машинного обучения; DBSCAN – алгоритм кластеризации по плотности / Machine learning library; DBSCAN is a density-based clustering algorithm	Выявление локальных скоплений пор по координатам центроидов (eps в мм, min_samples = 3), расчет доли пор в кластерах для компоненты кластерности в итоговом балле / Identifies local clusters of pores based on centroid coordinates (eps in mm, min_samples = 3); calculates the proportion of pores within clusters for the clustering component of the final point score
NumPy	Базовая библиотека численных вычислений и работы с массивами / Fundamental library for numerical computing and array operations	Быстрые операции над матрицами/масками (подсчет долей пикселей, преобразования координат, агрегирование статистик) / Performs fast matrix/mask operations (pixel fraction calculation, coordinate transformations, statistical aggregation)

Окончание табл. 3

The End Table 3

Компонент, библиотека / Component, Library	Назначение / Function	Роль в разработанном ПО / Use in the developed tool
Pandas	Инструменты табличной обработки данных (DataFrame) и подготовки отчетов / Tabular data processing (DataFrame) and report generation tools	Формирование сводной таблицы Summary и таблицы Pores (по каждой поре: площадь, диаметр, координаты, кластер) / Creates summary tables (Summary) and detailed pore tables (Pores) with parameters for each pore: area, diameter, coordinates, cluster affiliation
openpyxl	Запись/чтение файлов Excel формата .xlsx / Write-read support for Excel .xlsx files	Экспорт результатов в Excel: отдельные листы Summary (настройки и итоговые показатели) и Pores (параметры каждой поры) / Exports results to Excel: separate sheets for Summary (settings and integral metrics) and Pores (parameters of each individual pore)

результаты, что позволяет визуально контролировать корректность сегментации пор до формирования итоговых метрик.

В верхней части боковой панели располагается блок калибровки, в котором задается количество пикселей, соответствующих 1 мм (на образце 12-5 калибровка 1 мм = 716 px). На основании введенного значения программа автоматически рассчитывает коэффициент пересчета mm/px, далее используемый для перевода всех линейных размеров пор из пикселей в миллиметры.

Блок панели «ROI» предназначен для исключения служебной области SEM-снимка (подписи, шкала, параметры съемки). Пользователь может отметить, что изображение уже обрезано (используется только поле образца), либо задать долю обрезки снизу. Таким образом обеспечивается анализ исключительно области материала без влияния графических элементов, не относящихся к структуре образца.

Блок «Контраст / Порог» содержит параметры усиления контраста и бинаризации. Для стабилизации выделения пор при неоднородном освещении применяется локальное контрастирование (CLAHE), управляемое параметрами clipLimit и tileGrid. Далее выбирается метод бинаризации – Otsu (автоматический глобальный порог) или Adaptive (локальная бинаризация с параметрами размера окна и поправки). Дополнительно предусмотрен переключатель инверсии, позволяющий корректно обрабатывать

случаи, когда после бинаризации поры визуально выделяются «не тем» цветом. Логика сегментации ориентирована на то, что поры на SEM-изображении обычно выглядят темнее матрицы материала.

В блоке «Очистка маски» задаются параметры постобработки бинарной маски: минимальная площадь поры (отсечение мелкого шума) и радиусы морфологических операций closing/opening, которые используются для сглаживания границ пор и удаления единичных артефактов. Настройка этого блока позволяет добиться устойчивой сегментации при различной текстуре поверхности и уровне шумов на снимке.

Блок «Кластерность» содержит параметры выявления локальных скоплений пор. В реализованной методике кластер определяется как не менее трех пор в пределах радиуса 0,5 мм. Это правило соответствует настройкам алгоритма DBSCAN (eps, min_samples) и может быть изменено пользователем при необходимости. Результатом работы данного блока является определение наличия кластеров, их количества, а также вычисление доли пор, принадлежащих кластерам (используется при расчете интегральной оценки дефектности).

В основной области окна последовательно выводятся изображения ROI (после обрезки), изображение после контрастирования (CLAHE), результат бинаризации (порог), маска пор, а также наложение маски на исходное изображение (поры выделены красным цветом для наглядной

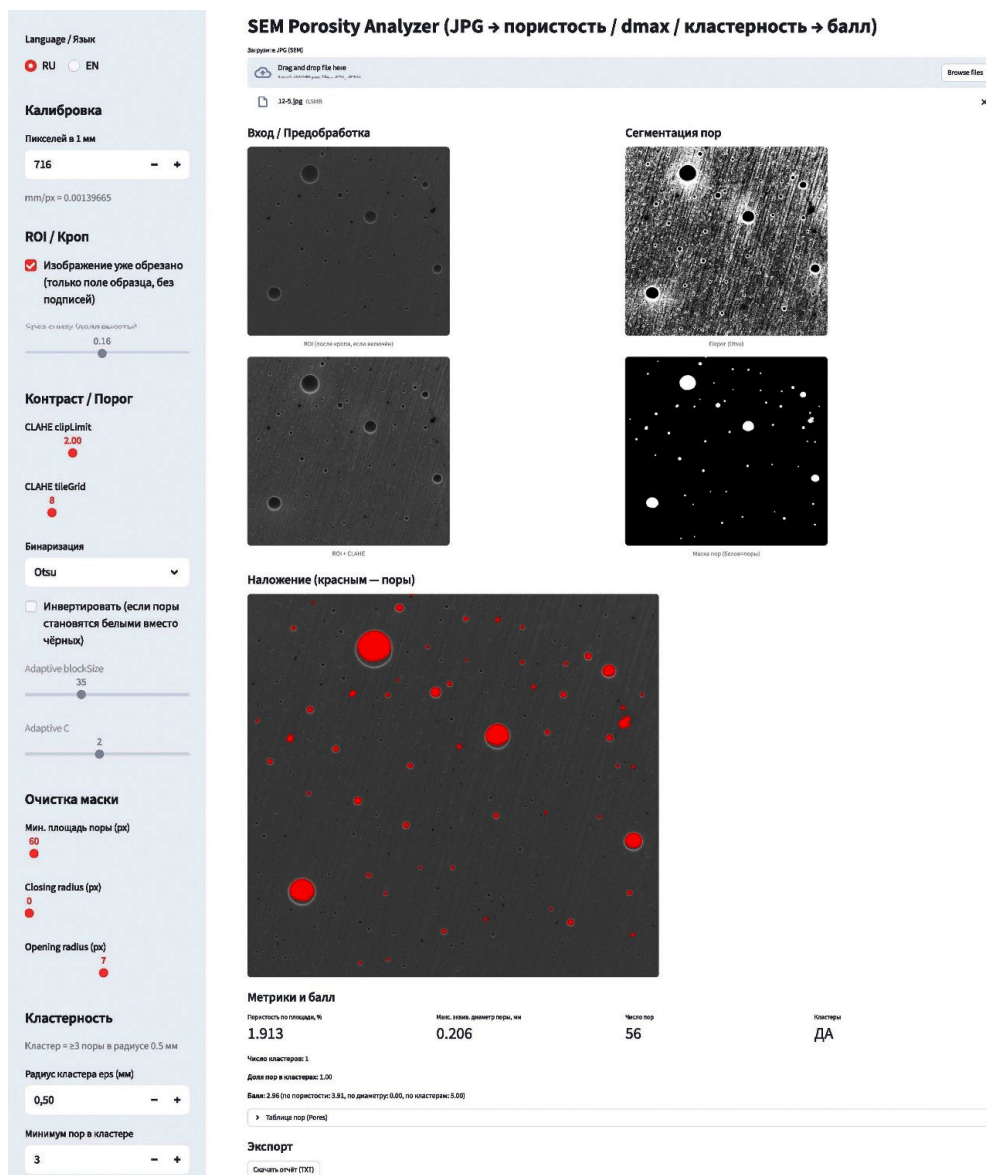


Рис. 5. Окно разработанного программного обеспечения SEM Porosity Analyzer при обработке образца 12-5

Fig. 5. Interface of the developed SEM Porosity Analyzer software during processing of sample 12-5

проверки). Ниже отображается панель «Метрики и балл», включающая в себя пористость по площади P , максимальный эквивалентный диаметр поры $d_{\max}$, количество пор, наличие кластеров и итоговый интегральный балл (с отображением вкладов отдельных компонентов). Дополнительно доступна разворачиваемая таблица, содержащая параметры каждой поры (площадь, эквивалентный диаметр, координаты центроида, принадлежность кластеру). В конце окна размещен блок «Экспорт», позволяющий выгружать отчет в TXT и Excel (лист Summary с параметрами обработки и сводными показателями, лист Pores с построчными данными по порам).

Для повышения устойчивости сегментации к шуму бинарную маску пор подвергали морфологической очистке: удаляли мелкие объекты с площадью меньше заданного порога, после чего применяли операции closing и opening с радиусом структурирующего элемента, задаваемым пользователем, для сглаживания границ пор и подавления единичных артефактов. Это особенно актуально для уменьшения шума от рисок обрабатывающего инструмента при подготовке образцов.

Количественную оценку пористости выполняли по очищенной бинарной маске, полученной в результате сегментации пор в преде-

лах области интереса (ROI). Площадную долю пор P (%) определяли как отношение числа пикселей, отнесенных к порам, к общему числу пикселей в ROI:

$$P = 100 \frac{N_{\text{pore}}}{N_{\text{all}}}, \quad (4)$$

где N_{pore} – число пикселей, соответствующих порам; N_{all} – общее число пикселей в ROI.

Для каждой поры как связной области бинарной маски вычисляли геометрические характеристики (площадь, координаты центра, эквивалентный диаметр). Эквивалентный диаметр d_{eq} определяли по площади поры A :

$$d_{\text{eq}} = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}. \quad (5)$$

Линейные размеры пересчитывали из пикселей в миллиметры по калибровочному коэффициенту mm/pix . Максимальный эквивалентный диаметр поры d_{max} принимали равным максимальному значению d_{eq} по всем порам, выявленным в пределах ROI.

Кластерность пор оценивали по координатам центроидов пор (в миллиметрах) методом DBSCAN. Кластер трактовали как локальное скопление не менее трех пор в пределах радиуса 0,5 мм (параметры алгоритма: $\text{eps} = 0,5$ мм; $\text{min_samples} = 3$). Для количественной интерпретации вычисляли показатель C – долю пор, принадлежащих кластерам:

$$C = \frac{n_{p,cl}}{N}, \quad (6)$$

где $n_{p,cl}$ – число пор, отнесенных алгоритмом DBSCAN к кластерам (метка $\text{label} \neq -1$); N – общее число пор в ROI.

Интегральную (десятичную) оценку дефектности формировали на основе трех частных показателей: по пористости S_P , по максимальному диаметру S_d и по кластерности S_C . Частные оценки S_P и S_d определяли по порогам табл. 1 с линейной интерполяцией внутри каждого интервала (для P : 0,05; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 %; для d_{max} : 0,30; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 мм). Кластерный компонент переводили в шкалу 0...5 по зависимости:

$$S_C = 5\sqrt{C}. \quad (7)$$

Итоговый балл S вычисляли как средневзвешенную сумму частных компонентов при весовых коэффициентах 0,5/0,3/0,2:

$$S = 0,5S_P + 0,3S_d + 0,2S_C. \quad (8)$$

Для сохранения консервативной логики приемки при достижении браковочных значений принимали $S = 5$ при $P > 4$ % или $d_{\text{max}} > 2,0$ мм.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследование было направлено на выбор режима вибровоздействия, обеспечивающего максимальную текучесть МПКМ при заполнении форм, но без признаков расслоения и вспенивания. Оценку проводили по времени заполнения оснастки, формирующей пять цилиндрических образцов за один прогон. Экспериментально [12] установлено, что частота 40...60 Гц при амплитуде 0,2...0,6 мм обеспечивает минимальное время заполнения и, следовательно, наилучшую заполняемость полостей при сохранении структурной стабильности композиции (без видимых признаков разделения фаз и провоцирования вспенивания) [12, 13]. Указание диапазона связано с тем, что система «оснастка – форма – композиция» является динамически податливой. При работе с массивной оснасткой наблюдаются флуктуации частоты и амплитуды вследствие собственных колебаний, изменения массы и распределения материала, а также фоновых механических шумов. В рамках каждой серии опытов параметры контролировались и оставались в пределах указанного диапазона. Влияние этих флуктуаций учитывается в статистической оценке воспроизводимости результатов.

С технологической точки зрения это важно именно для МКТ-корпусов инструментов: заполнение внутренних полостей тонкостенной SLM-оболочки происходит в условиях ограниченного сечения каналов подвода, наличия локальных «карманов» и зон повышенного риска вовлечения воздуха (в том числе вблизи стенки оболочки и рядом с каналами СОТС). Поэтому режим вибрации далее фиксировался как постоянный, а фактором варьирования на втором этапе принимался уровень вакуума.

На втором этапе определялась закономерность изменения газовой пористости МПКМ

в зависимости от давления в вакуумной камере при неизменных параметрах вибрации (40...60 Гц; 0,2...0,6 мм). Порообразование при вакуум-инфузии обусловлено захватом воздуха, выделением летучих компонентов и особенностями фронта пропитки. Эти механизмы подробно анализируются в моделях формирования пустот. Для эпоксидных систем отдельно выделяется вклад летучих индуцированных пор и показаны подходы к их подавлению изменением режимов вакуумирования и стадий давления. Диапазон давлений охватывал условия от атмосферных до глубокого вакуума 101 325...50 Па, причем в зоне «слабого вакуума» использовали

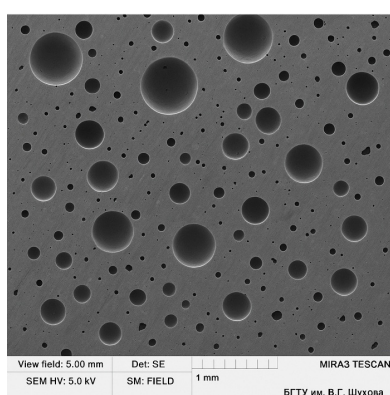
укрупненные шаги, а в области рабочих значений ($p \leq 600$ Па) – шаг 50 Па.

Схема варьирования была следующей:

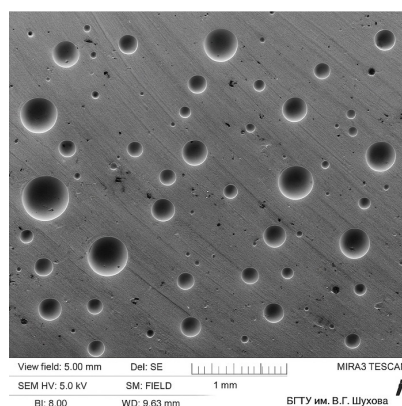
– в области высоких давлений (слабый вакуум) использовались укрупненные шаги: 101 325; 5000; 2000; 1000; 800 Па;

– в области «рабочих» значений вакуума ($p \leq 600$ Па) шаг изменения давления составлял 50 Па: 600; 550; 500; 450; 400; 350; 300; 250; 200; 150; 100; 50 Па.

На рис. 6–13 показаны результаты микроскопии соответствующих образцов, полученных при различных значениях остаточного давления.



a



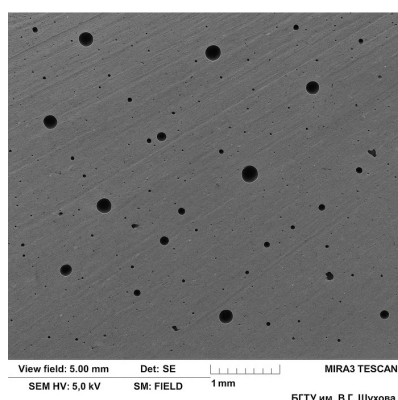
б

Рис. 6. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

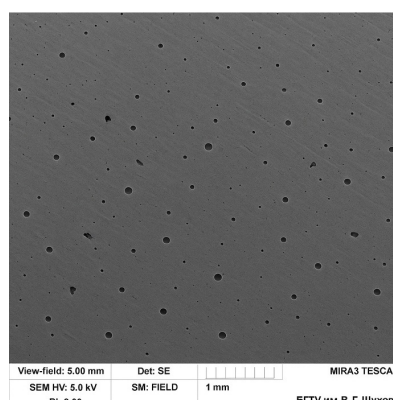
a – давление при дегазации, 5000 Па; *б* – давление при дегазации, 2000 Па

Fig. 6. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 5,000 Pa; *б* – degassing pressure 2,000 Pa



a



б

Рис. 7. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

a – давление при дегазации, 1000 Па; *б* – давление при дегазации, 800 Па

Fig. 7. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 1,000 Pa; *б* – degassing pressure 800 Pa

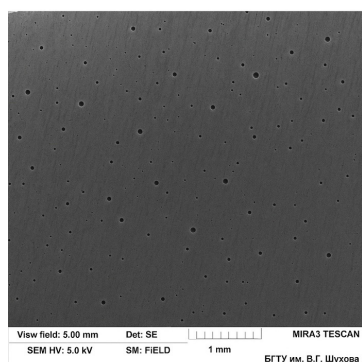
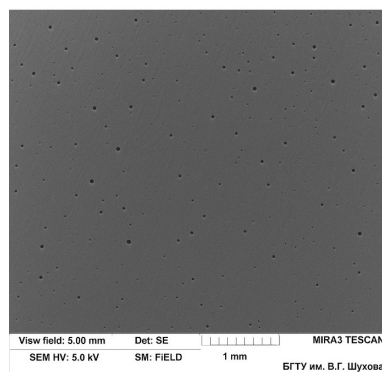

a

б

Рис. 8. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

a – давление при дегазации, 600 Па; *б* – давление при дегазации, 550 Па

Fig. 8. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 600 Pa; *б* – degassing pressure 550 Pa

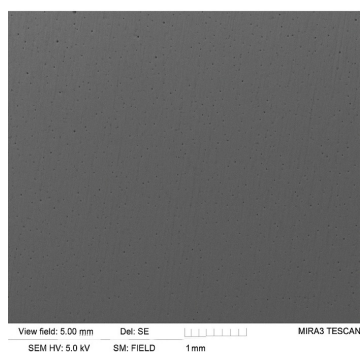
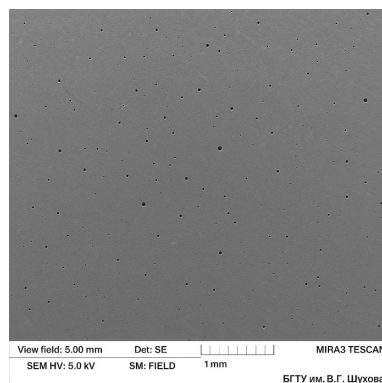

a

б

Рис. 9. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

a – давление при дегазации, 500 Па; *б* – давление при дегазации, 450 Па

Fig. 9. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 500 Pa; *б* – degassing pressure 450 Pa

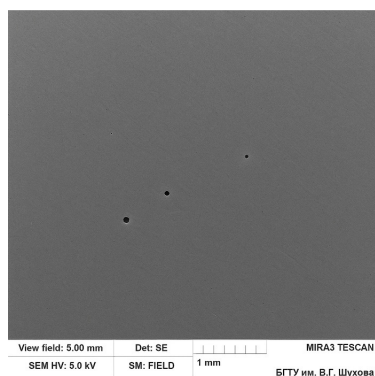
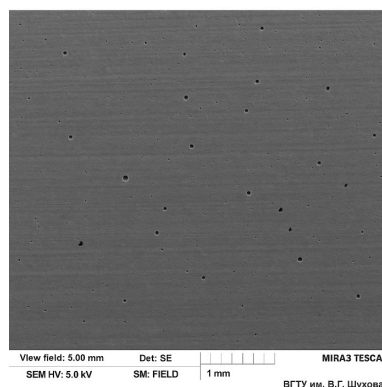

a

б

Рис. 10. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

a – давление при дегазации, 400 Па; *б* – давление при дегазации, 350 Па

Fig. 10. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 400 Pa; *б* – degassing pressure 350 Pa

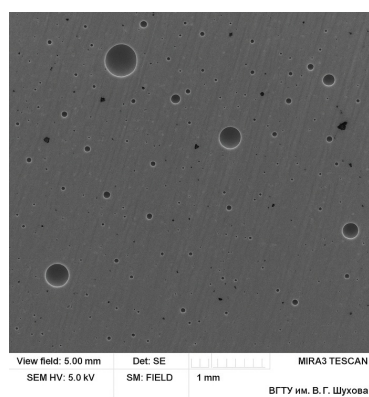
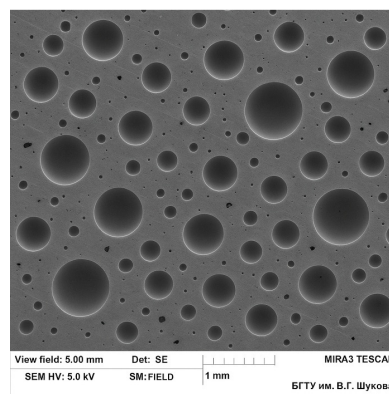
*a**б*

Рис. 11. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

a – давление при дегазации, 300 Па; *б* – давление при дегазации, 250 Па

Fig. 11. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 300 Pa; *б* – degassing pressure 250 Pa

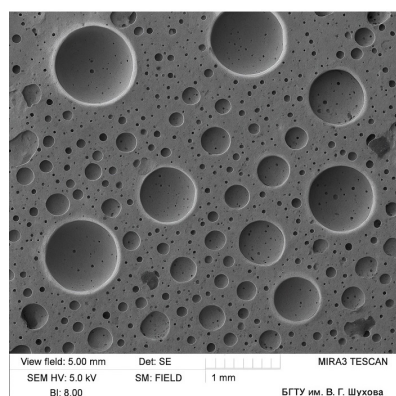
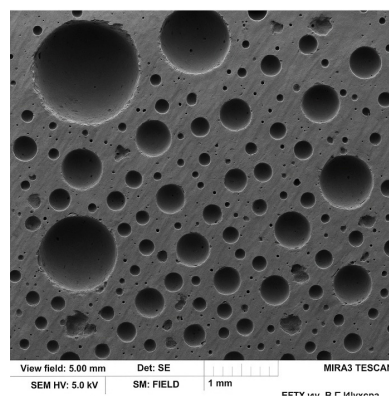
*a**б*

Рис. 12. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

a – давление при дегазации, 200 Па; *б* – давление при дегазации, 150 Па

Fig. 12. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 200 Pa; *б* – degassing pressure 150 Pa

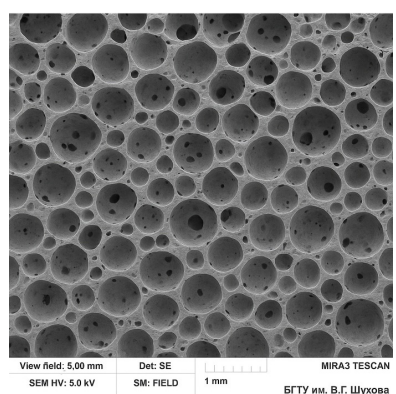
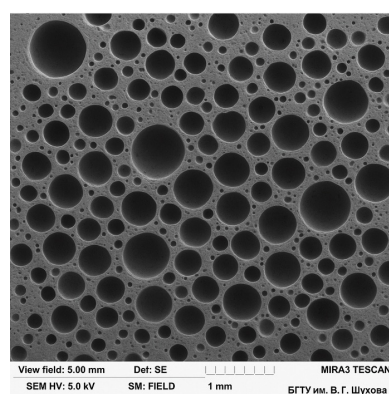
*a**б*

Рис. 13. Изображение микроскопии образцов МПКМ:

a – давление при дегазации, 100 Па; *б* – давление при дегазации, 50 Па

Fig. 13. Microscopy image of MPCM samples:

a – degassing pressure 100 Pa; *б* – degassing pressure 50 Pa

Результаты сведены в табл. 4, построенную по среднему значению балльной оценки пористости по пяти образцам на каждый режим (в каждом опыте оценивалось пять образцов).

По данным табл. 2 установлены три характерные области поведения.

1. Высокие давления (отсутствие эффективной дегазации) (101 325...2000 Па).

При атмосферном давлении и при p порядка нескольких тысяч паскалей наблюдается развитая пористость: крупные поры, кластеры, неравномерность распределения; средний балл пористости остается высоким (например, 4,5 балла при 101 325 Па; 3,8 балла при 5000 Па; 3,2 балла при 2000 Па), и материал для ответственного заполнения МКТ-корпусов признается непригодным.

Таблица 4

Table 4

Влияние уровня вакуума при дегазации на балльную оценку пористости МПКМ
Influence of the vacuum level during degassing on the scoring of the porosity of MPCM

№ опыта / Exp. No.	Давление дегазации, p , Па / Degassing pressure, p (Pa)	Характер пористости / Porosity character	Средний балл / Mean score	Оценка пригодности / Acceptance assessment	Балл пористости образца / Sample porosity score					$\Delta 95$
					1	2	3	4	5	
1	101 325	Крупные поры, кластеры, неравномерное распределение / Large pores, clusters, uneven distribution	4,5	Не допускается / Not acceptable	5,0	3,8	4,3	4,6	4,8	0,58
2	5000	Развитая пористость, отдельные кластеры / Developed porosity, individual clusters	3,8	Не допускается / Not acceptable	5,0	3,5	3,5	3,5	3,5	0,83
3	2000	Поры средней величины, пористость снижена, но значительная / Medium-sized pores, porosity reduced but still significant	3,2	Не допускается / Not acceptable	5,0	2,7	2,7	2,8	2,8	1,25
4	1000	Дисперсные и средние поры, кластерность снижается / Dispersed and medium pores, clustering decreases	2,7	Условно допустимо / Conditionally acceptable	2,4	3,3	2,6	2,6	2,6	0,43
5	800	В основном мелкие поры, единичные более крупные / Mostly fine pores, isolated larger ones	2,3	Условно допустимо / Conditionally acceptable	2,1	2,7	2,3	2,1	2,3	0,30
6	600	Дисперсные мелкие поры без выраженных кластеров / Dispersed fine pores without pronounced	2,1	Условно допустимо / Conditionally acceptable	1,8	2,3	2,2	2,1	2,1	0,30
7	550	Мелкие поры, равномерное распределение / Fine pores, uniform distribution	2,0	Условно допустимо / Conditionally acceptable	1,7	2,3	2,1	1,9	2,0	0,28

№ опыта / Exp. No.	Давление дегазации, p , Па / Degassing pressure, p (Pa)	Характер пористости / Porosity character	Средний балл / Mean score	Оценка пригодности / Acceptance assessment	Балл пористости образца / Sample porosity score					$\Delta 95$
					1	2	3	4	5	
8	500	Мелкая дисперсная пористость / Fine dispersed porosity	1,9	Допускается / Acceptable	1,6	2,2	1,9	1,8	2,0	0,25
9	450	Мелкие поры, кластеры отсутствуют / Fine pores, no clusters	1,8	Допускается / Acceptable	1,5	2,1	1,8	1,7	1,9	0,24
10	400	Единичные мелкие поры, практически без кластеров / Isolated fine pores, practically no clusters	1,2	Оптимально / Optimal	0,9	1,7	1,1	1,3	1,2	0,37
11	350	Дисперсная пористость, единичные поры / Dispersed porosity, isolated pores	1,5	Оптимально / Optimal	1,3	1,7	1,5	1,6	1,4	0,12
12	300	Начало «закипания», укрупнение пор, локальные кластеры / Onset of "ebullition" (boiling), pore coarsening, local clusters	3,0	Не допускается / Not acceptable	2,3	3,5	3,2	3,1	2,9	0,59
13	250	Крупные поры, вспенивание, выраженная кластерность / Large pores, foaming, pronounced clustering	3,5	Не допускается / Not acceptable	5,0	3,1	3,1	3,1	3,2	1,04
14	200	Развитое вспенивание, крупные пустоты / Developed foaming, large voids	4,0	Не допускается / Not acceptable	5,0	3,7	3,7	3,8	3,8	0,70
15	150	Выраженная микропористость / Pronounced microporosity	4,3	Не допускается / Not acceptable	5,0	3,8	4,0	4,3	4,4	0,57
16	100	Крупные полости, структурная неоднородность / Large cavities, structural heterogeneity	4,6	Не допускается / Not acceptable	5,0	4,2	4,4	4,6	4,8	0,39
17	50	Сильное вспенивание, сплошные газовые области / Severe foaming, continuous gas regions	5,0	Не допускается / Not acceptable	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	0,00

2. Рабочая область с монотонным снижением пористости (1000...450 Па).

При переходе к более глубокому вакууму средний балл пористости устойчиво снижается: при 1000 Па – 2,7; при 800 Па – 2,3; при 600 Па – 2,1; при 500 Па – 1,9; при 450 Па – 1,8. Качественно это соответствует переходу от дисперсных/средних пор с остаточной кластерностью к мелкой дисперсной пористости без кластеров, что уже допускается для заполнения полостей SLM-оболочек.

3. Оптимум и область «закипания» (400...50 Па).

Минимальная пористость достигается при $p = 400...350$ Па, где средний балл составляет 1,2...1,5, и режим квалифицируется как оптимальный (табл. 2). Однако при дальнейшем снижении давления до $p \leq 300$ Па фиксируется качественный переход: начинается интенсивное «закипание» композиции и вспенивание, сопровождаемое резким ростом пористости (например, 3,0 балла при 300 Па; 3,5 – при 250 Па; 4,0 – при 200 Па; вплоть до 5,0 баллов при 50 Па).

Помимо балльной оценки по бинаризованным SEM-изображениям была рассчитана площадьная доля пор P (%) и оценены размерные характеристики пор (эквивалентный диаметр). Количественные значения P (%) для ключевых режимов (оптимальная область, пограничная область и область вспенивания при $p \leq 300$ Па) приведены в табл. 5 и подтверждают выводы, полученные по балльной шкале.

Таким образом, эксперимент подтверждает закономерность V-образного типа: при увеличении глубины вакуума от атмосферного до примерно 450 Па пористость снижается, но при чрезмерном вакууме ниже 300 Па материал пе-

реходит в режим вспенивания и микропористости. В этих условиях увеличение дефектности обусловлено преимущественно ростом характерных размеров пор и расширением диапазона эквивалентных диаметров d_{eq} , а также появлением кластеров, что сопровождается увеличением площадной доли пор P . При этом плотность отдельных пор N_{pores} может снижаться вследствие слияния мелких пор в более крупные дефекты.

Наблюдаемая V-образная зависимость пористости от остаточного давления при вибровакuumной дегазации может быть интерпретирована как результат конкуренции двух механизмов, действующих в противоположных направлениях. При сравнительно высоких давлениях (слабый вакуум) доминирует неполное удаление газовой фазы, тогда как при слишком глубоком вакууме усиливается вторичная генерация пор (вспенивание) и рост дефектности.

Газовая фаза в анализируемой металлополимерной системе имеет смешанную природу и может включать в себя захваченный воздух (введенный при замесе/перемешивании и заливке); растворенные газы (прежде всего воздух, растворенный в полимерной матрице до отверждения); летучие компоненты; влагу (адсорбированную на наполнителе и стенках оснастки); газообразные продукты реакций (возможны локально как следствие побочных процессов и (или) взаимодействия с влагой, особенно на ранней стадии отверждения).

В области «слабого вакуума» движущая сила дегазации невелика: давление в камере недостаточно снижает растворимость газов и не обеспечивает активного всплытия пузырьков. Вязкость

Таблица 5

Table 5

Количественные показатели пористости МПКМ по результатам анализа SEM-изображений (площадная доля пор и размерные характеристики)

Quantitative porosity metrics of MPCM from SEM image analysis (area fraction of pores and pore size characteristics)

№ образца / Sample No.	p , Па / p (Pa)	P , % (среднее) / P (%) (Mean)	$\Delta 95$, %	$d_{эkv}$, мкм (середина) / d_{eq} (μm) (Median)	$d_{эkv}$, мкм (P10–P90) / d_{eq} (μm) (P10–P90)	$N_{пор}$, 1/мм ² / N_{pores} (1/mm ²)
4	1000	1,45	0,35	170	55...520	105
10	400	0,32	0,10	55	20...140	140
12	300	2,40	0,60	260	70...1300	65

композиции (усиливаемая высоким наполнением) дополнительно ограничивает всплытие и коалесценцию пузырьков, поэтому часть газовой фазы фиксируется в объеме, формируя пористость после отверждения.

При дальнейшем снижении давления ($p \leq 300$ Па) включается противоположный механизм: резкое падение внешнего давления приводит к интенсивной нуклеации и росту пузырьков. Это может быть связано с достижением или приближением к давлению насыщенных паров присутствующих летучих компонентов при 20...25 °С или с быстрым выделением растворенных газов при снижении растворимости. Наличие большого числа центров нуклеации (границы «наполнитель – матрица», микронеровности, локальные неоднородности) способствует множественному зарождению пузырьков и формированию мелкодисперсной пористости. В результате при слишком глубоком вакууме вклад вторичной генерации пор начинает превосходить эффект удаления первичного газа, что и приводит к росту дефектности на правой ветви V-образной кривой.

Область порядка 400 Па соответствует компромиссу: давление уже достаточно низкое, чтобы эффективно расширять и удалять первично захваченные пузырьки и уменьшать растворенный газ, но еще недостаточно низкое для массового запуска интенсивной нуклеации пузырьков по всему объему. Это согласуется с тем, что при указанном давлении достигается минимальная балльная оценка пористости и наиболее благоприятная морфология пор.

Полученная форма зависимости и наличие оптимального уровня разрежения качественно согласуются с данными, приводимыми для дегазации реактивных эпоксидных систем: в работах, посвященных вакуумной дегазации смол [8, 10], подчеркивается, что избыточное снижение давления не всегда приводит к дальнейшему улучшению качества, поскольку при слишком глубоком вакууме возможны вспенивание и рост пористости из-за испарения летучих компонентов и интенсивного выделения растворенных газов. В отличие от маловязких эпоксидных смол исследуемая МПКМ-композиция является высоконаполненной и существенно более вязкой, поэтому оптимум по давлению может смещаться и становиться более выраженным: с одной

стороны, повышается сопротивление всплытию пузырьков, с другой – возрастает число центров нуклеации на границах фаз. Эти особенности объясняют как наличие выраженного минимума пористости при промежуточном давлении, так и рост дефектности при чрезмерно глубоком вакууме.

Анализ микрофотографий (рис. 6–13) показывает, что при изменении давления дегазации меняется не только интегральная оценка дефектности, но и морфология пор. В области слабого вакуума преобладают относительно крупные единичные поры и протяженные дефекты, что соответствует неполному удалению первично захваченного воздуха. Поры имеют более выраженную вариативность размеров и встречаются локальные скопления. При переходе к оптимальному давлению около 400 Па наблюдается наиболее «чистая» структура, уменьшается как площадь доля пор, так и доля крупных дефектов. Распределение пор по размерам смещается в область меньших d_{eq} , а поры становятся более изолированными (снижается склонность к кластеризации). При дальнейшем снижении давления ($p \leq 300$ Па) структура меняется на противоположную, формируется мелкодисперсная пористость с большим числом пор на единицу площади, что соответствует интенсивной нуклеации и росту пузырьков по всему объему (вспениванию). Количественно это проявляется ростом плотности пор и изменением распределения эквивалентных диаметров при одновременном ухудшении суммарной дефектности.

Следует отметить, что в рамках настоящей работы межоператорная воспроизводимость балльной шкалы не оценивалась (оценивание выполнялось одним оператором), а также не проводилась статистическая валидация шкалы по корреляции с количественными параметрами пористости (P , %, характеристики d_{eq}). Указанные проверки будут выполнены в дальнейших исследованиях.

Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рис. 14.

С практической точки зрения выявленная зависимость имеет прямое объяснение через противоречие двух механизмов. При недостаточном вакууме (высокие давления) удаление растворенного и вовлеченного воздуха идет ограниченно, пузырьки сохраняются и объеди-

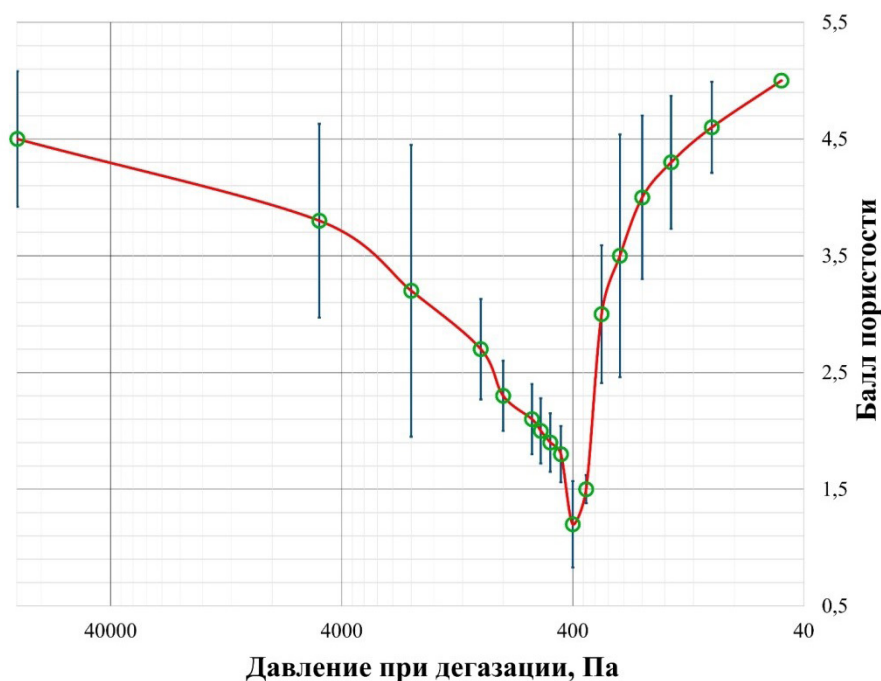


Рис. 14. Зависимость балльной оценки пористости МПКМ от давления при дегазации

Fig. 14. Dependence of the MPCM porosity score on degassing pressure

няются в кластеры. Для МКТ-корпусов это критично: поры вблизи стенки тонкостенной SLM-оболочки и рядом с каналами СОТС формируют локальные дефекты заполнения, ухудшают теплопроводность и создают зоны неоднородной жесткости, что снижает воспроизводимость свойств и повышает риск дефектов при последующей эксплуатации инструмента. При чрезмерно глубоком вакууме композиция переходит к режиму активного газовыделения, что приводит к укрупнению пор и росту микропористости. В технологическом смысле это означает, что стремление «сделать вакуум сильнее» после некоторого порога становится контрпродуктивным: вместо дегазации происходит вспенивание и формирование крупных газовых областей, что по критериям пригодности однозначно неприемлемо. Полученная V-образная зависимость пористости от остаточного давления согласуется с выводами других авторов (в работах [18–22]) о наличии оптимального разрежения при дегазации реактивных систем.

Экспериментально установленный оптимальный диапазон 400...350 Па является компромиссом: он обеспечивает минимальную пористость по принятой шкале (1...2 балла) при отсутствии эффекта вспенивания – и именно по-

этому рекомендован для технологического применения при изготовлении МКТ-корпусов режущего инструмента.

На основании эксперимента сформулированы рекомендуемые режимы дегазации с использованием вибровacuумной установки: глубина вакуума примерно 400 Па, выдержка при заданном остаточном давлении 5 минут (отсчет времени – после достижения и стабилизации давления), температура композиции 20...25 °С. Время выхода на режим и стабилизации давления в вакуумной камере составляло 3...7 минут и в выдержку 5 минут не включалось.

Выводы

В работе экспериментально исследовано влияние остаточного давления при вибровacuумной дегазации на газовую пористость МПКМ и определен технологически предпочтительный диапазон вакуума для применения в МКТ-корпусах режущего инструмента. Полученные результаты позволяют сформировать воспроизводимую методику контроля и практические рекомендации для условий мелкосерийного производства.

1. Адаптированы методика оценки пористости и критерии приемки МПКМ применитель-

но к МКТ-корпусам: введена балльная шкала микродефектности и регламентирована SEM-микроскопия с автоматизированной обработкой изображений, обеспечивающая сопоставимость серий и воспроизводимость оценки.

2. Проведена серия экспериментов при различных значениях остаточного давления с изготовлением параллельных образцов ($n = 5$ для каждого режима) и статистической обработкой результатов (среднее значение, 95 % ДИ), что обеспечило корректное сравнение режимов дегазации.

3. Установлена закономерность «давление – пористость» и определены оптимальная и критическая области параметров: минимум пористости достигается при $p \approx 400...350$ Па, тогда как при $p \leq 300$ Па проявляется вспенивание и рост дефектности. На этой базе обоснованы технологически предпочтительный диапазон вакуума и технологические ограничения заполнения SLM-оболочек МКТ-корпусов.

4. Параметры выдержки 5 минут после стабилизации давления и температуры композиции 20...25 °С в настоящем исследовании не варьировались и использовались как фиксированные условия эксперимента; поэтому они приводятся как рабочие технологические параметры, рекомендованные на основе технологического опыта, тогда как экспериментально обоснованным фактором в данной серии является диапазон остаточного давления.

Список литературы

1. Kelliger T., Meurer M., Bergs T. Potentials of additive manufacturing for cutting tools: a review of scientific and industrial applications // *Metals*. – 2024. – Vol. 14 (9). – P. 982. – DOI: 10.3390/met14090982.
2. Kugaevskii S.S., Gamberg A.E., Kulpina K.A. Development of modular later cutter with the application of additive technologies // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*, Chelyabinsk, May 18–22, 2020. – Springer, 2021. – P. 114–122. – DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_14.
3. Reducing the cost of 3D metal printing using selective laser melting (SLM) technology in the manufacture of a drill body by reinforcing thin-walled shell forms with metal-polymers / N.S. Lubimyi, M. Chepchurov, A.A. Polshin, M.D. Gerasimov, B.S. Chetverikov, A. Chetverikova, A.A. Tikhonov, A. Maltsev // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 44. – DOI: 10.3390/jmmp8020044.
4. Al-Sulaiman F., Mokheimer E., Al-Nassar Y. Prediction of the thermal conductivity of the constituents of fiber-reinforced composite laminates // *Heat and Mass Transfer*. – 2006. – Vol. 42. – P. 370–377. – DOI: 10.1007/s00231-005-0636-7.
5. The technological heredity in the manufacture of the metallopolymeric build-forming molds / N.S. Lubimyi, M.S. Chepchurov, B.S. Chetverikov, N.A. Tabekina, E.I. Evtushenko // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11 (20). – P. 12302–12310.
6. Influence of dissolved gasses in epoxy resin on resin infusion part quality / S. van Oosterom, A. Schreier, M. Battley, S. Bickerton, T. Allen // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2020. – Vol. 132. – P. 105818. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105818.
7. Chen D., Arakawa K., Xu C. Reduction of void content of vacuum-assisted resin transfer molded composites by infusion pressure control // *Polymer Composites*. – 2014. – Vol. 36 (9). – P. 1629–1637. – DOI: 10.1002/pc.23071.
8. Void content minimization in vacuum infusion (VI) via effective degassing / J. Juan, A. Silva, J.A. Tornero, J. Gámez, N. Salán // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 2876. – DOI: 10.3390/polym13172876.
9. Evaluating vibration assisted vacuum infusion processing of hexagonal boron nitride sheet modified carbon fabric/epoxy composites in terms of interlaminar shear strength and void content / R. Meier, I. Kahraman, A.T. Seyhan, S. Zaremba, K. Drechsler // *Composites Science and Technology*. – 2016. – Vol. 128. – P. 94–103. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.03.022.
10. Evaluating random vibration assisted vacuum processing of carbon/epoxy composites in terms of interlaminar shear strength and porosity / X. Yang, L. Zhan, C. Jiang, X. Zhao, C. Guan, T. Chang // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53 (17). – P. 2367–2376. – DOI: 10.1177/0021998319829531.
11. ЗАО «Металлополимерные материалы ЛЕО». Технические условия ТУ 2257-002-48460567-00. Металлополимер «Ферро-хром». – М., 2000. – URL: <http://leopolimer.ru/> (дата обращения: 23.03.2026).
12. Experimental substantiation of the technology for manufacturing composite parts based on a viscous metal-polymer / A. Polshin, N. Lubimyi, B. Chetverikov, M. Chepchurov, A. Maltsev, A. Tikhonov // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. – 2024. – Vol. 23 (3). – P. 488–498. – DOI: 10.1080/14484846.2024.2343449.
13. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance / M. Mehdikhani, L. Gorbatikh,

I. Verpoest, S.V. Lomov // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53 (12). – P. 1579–1669. – DOI: 10.1177/0021998318772152.

14. ГОСТ 19200–80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов: взамен ГОСТ 19200–73: введен 01.07.81. – Переизд. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005049> (дата обращения: 23.03.2026).

15. ГОСТ Р 56679–2015. Композиты полимерные. Метод определения пустот: дата введения 1981–07–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758544.pdf> (дата обращения: 23.03.2026).

16. ISO 7822:1990(E). Textile glass reinforced plastics – Determination of void content – Loss on ignition, mechanical disintegration and statistical counting methods. – Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 1990. – 9 p. – URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/14740/1052bc459edd47acb887089816ec199d/ISO-7822-1990.pdf> (accessed: 23.03.2026).

17. Effect of processing parameters and void content on mechanical properties and NDI of thermoplastic composites / D. Saenz-Castillo, M.I. Martín, S. Calvo, F. Rodriguez-Lence, A. Güemes // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 121. – P. 308–320. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.03.035.

18. Lee D.H., Lee W.I., Kang M.K. Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process // *Composites Science and Technology*. – 2006. – Vol. 66 (16). – P. 3281–3289. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.07.008.

19. Formation and suppression of volatile-induced porosities in an RTM epoxy resin / C. Pupin, A. Ross, C. Dubois, J.-C. Rietsch, N. Vernet, E. Ruiz // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2017. – Vol. 94. – P. 146–157. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.12.006.

20. Degassing process influence on tensile strength of neat E132 epoxy polymeric materials / D. Wong, M. Anwar, S. Debnath, A. Hamid, I. Sudin, A. Pramanik // *Materials Science Forum*. – 2021. – Vol. 1026. – P. 129–135. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1026.129.

21. Choi J., Jung H., Han S. The effect of porosity on the thermal conductivity of highly thermally conductive adhesives // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15 (14). – P. 3083. – DOI: 10.3390/polym15143083.

22. Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: a review / Y. Guo, K. Ruan, X. Shi, X. Yang, J. Gu // *Composites Science and Technology*. – 2020. – Vol. 193. – P. 108134. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108134.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Dependence of gas porosity in a metal-polymer composite on residual pressure during vibro-vacuum degassing for metal-composite tool bodies

Nikolay Lubimyi^a, Andrey Polshin^b, Boris Chetverikov^{c,*}, Vladislav Prokopenko^d, Ardalion Maltsev^e, Mikhail Bytsenko^f

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6131-3217>,  nslubim@bk.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>,  info@polshin.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>,  await_rescue@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-7120-1411>,  vlad.prokopenko1@yandex.ru;
^e  <https://orcid.org/0000-0002-0878-3658>,  ardalion_bgut@mail.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0004-2133-885X>,  b.michutka2005@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 02 February 2026

Revised: 12 February 2026

Accepted: 14 March 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Metal-composite technology
 Metal-polymer composite material
 Vibro-vacuum degassing
 Gas porosity
 SLM shell

Funding

This study was supported by grant No. 23-79-10022 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-79-10022/>.

Acknowledgements

The study was performed using the facilities of the High Technologies Center of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

ABSTRACT

Introduction. The metal-composite technology (*MCT*) for manufacturing tool bodies using an “*SLM* shell + metal-polymer composite material (Metal-polymer/*MPCM*)” enables the implementation of curvilinear coolant/lubricant supply channels and reduces the additively manufactured metal volume; however, the quality of filling thin-walled cavities is critically determined by the level of gas porosity of the filler. Gas porosity degrades the thermal conductivity and load-bearing capacity of the *MPCM*, reduces the stability of filling in critical zones near the *SLM* shell wall and adjacent to the channels, and increases properties dispersion and the risk of defects during tool operation. **The purpose of the work** is to experimentally establish the relationship between *MPCM* gas porosity and residual pressure under vibro-vacuum degassing and to justify a technologically preferable vacuum range for application in *MCT* tool bodies. **Methodology.** The study was carried out using a vibro-vacuum setup comprising a preliminary degassing chamber and a casting chamber with low-frequency vibration. Standard *MPCM* samples were produced for each vacuum condition. Porosity was evaluated using an adopted scoring scale based on microscopy (analysis of pore distribution, clustering, and characteristic defect sizes). **Results and discussion.** The experiment revealed a stable nonlinear (*V*-shaped) trend: as pressure decreases from atmospheric to approximately 450 Pa, the average porosity score monotonically decreases and reaches a minimum in the 400–350 Pa range (1–2 points). Further vacuum intensification below 300 Pa leads to vigorous gas evolution and foaming (“boiling”), accompanied by a sharp increase in defectiveness (up to 3–5 points). **Conclusions.** The identified optimal vacuum range of 400–350 Pa is recommended as a compromise between effective removal of entrapped gas and avoidance of the foaming, ensuring reproducible filling quality of *MPCM* within *SLM* shells in *MCT* tool-bodies manufacturing.

For citation: Lubimyi N.S., Polshin A.A., Chetverikov B.S., Prokopenko V.S., Maltsev A.K., Bytsenko M.V. Dependence of gas porosity in a metal-polymer composite on residual pressure during vibro-vacuum degassing for metal-composite tool bodies. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 6–31. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-6-31. (In Russian).

References

1. Kelliger T., Meurer M., Bergs T. Potentials of additive manufacturing for cutting tools: a review of scientific and industrial applications. *Metals*, 2024, vol. 14 (9), p. 982. DOI: 10.3390/met14090982.

* Corresponding author

Chetverikov Boris S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
 46 Kostyukova St.,
 308012, Belgorod, Russian Federation
 Tel.: +7 951 134-32-43, e-mail: await_rescue@mail.ru

2. Kugaevskii S.S., Gamberg A.E., Kulpina K.A. Development of modular lathe cutter with the application of additive technologies. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*, Chelyabinsk, Russia, May 18–22, 2020. Springer, 2021, pp. 114–122. DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_14.
3. Lubimyi N.S., Chepchurov M., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Chetverikov B.S., Chetverikova A., Tikhonov A.A., Maltsev A. Reducing the cost of 3D metal printing using selective laser melting (SLM) technology in the manufacture of a drill body by reinforcing thin-walled shell forms with metal-polymers. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (2), p. 44. DOI: 10.3390/jmmp8020044.
4. Al-Sulaiman F., Mokheimer E., Al-Nassar Y. Prediction of the thermal conductivity of the constituents of fiber-reinforced composite laminates. *Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 42, pp. 370–377. DOI: 10.1177/0021998305055548.
5. Ljubimyj N.S., Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Tabekina N.A., Evtushenko E.I. Technological heredity in the manufacture of metalopolymeric build-forming molds. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11 (20), pp. 12302–12310.
6. van Oosterom S., Schreier A., Battley M., Bickerton S., Allen T. Influence of dissolved gases in epoxy resin on resin infusion part quality. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, vol. 132, p. 105818. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105818.
7. Chen D., Arakawa K., Xu C. Reduction of void content of vacuum-assisted resin transfer molded composites by infusion pressure control. *Polymer Composites*, 2014, vol. 36 (9), pp. 1629–1637. DOI: 10.1002/pc.23071.
8. Juan J., Silva A., Tornero J., Gamez J., Salán N. Void content minimization in vacuum infusion (VI) via effective degassing. *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 2876. DOI: 10.3390/polym13172876.
9. Meier R., Kahraman I., Seyhan A., Zaremba S., Drechsler K. Evaluating vibration assisted vacuum infusion processing of hexagonal boron nitride sheet modified carbon fabric/epoxy composites in terms of interlaminar shear strength and void content. *Composites Science and Technology*, 2016, vol. 128, pp. 94–103. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.03.022.
10. Yang X., Zhan L., Jiang C., Zhao X., Guan C., Chang T. Evaluating random vibration assisted vacuum processing of carbon/epoxy composites in terms of interlaminar shear strength and porosity. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53 (17), pp. 2367–2376. DOI: 10.1177/0021998319829531.
11. JSC “Metal-Polymer Materials LEO”. *Technical specifications TU 2257-002-48460567-00. Metal-polymer “Ferro-chrome”*. Moscow, 2000. (In Russian). Available at: <http://leopolimer.ru/> (accessed 23.03.2026).
12. Polshin A., Lubimyi N., Chetverikov B., Chepchurov M., Maltsev A., Tikhonov A. Experimental substantiation of the technology for manufacturing composite parts based on a viscous metal-polymer. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2024, vol. 23 (3), pp. 488–498. DOI: 10.1080/14484846.2024.2343449.
13. Mehdikhani M., Gorbatiikh L., Verpoest I., Lomov S.V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53 (12), pp. 1579–1669. DOI: 10.1177/0021998318772152.
14. GOST 19200–80. *Otlivki iz chuguna i stali. Terminy i opredeleniya defektov* [State standard 19200–80. Iron and steel castings. Terms and definitions of defects]. Moscow, Standards Publ., 1992. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200005049> (accessed 23.03.2026).
15. GOST R 56679–2015. *Kompozity polimernye. Metod opredeleniya pustot* [State standard R 56679–2015. Polymer composites. Method for determination of voids]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758544.pdf> (accessed 23.03.2026).
16. ISO 7822:1990(E). *Textile glass reinforced plastics – determination of void content – loss on ignition, mechanical disintegration and statistical counting methods*. Geneva, International Organization for Standardization (ISO), 1990. 9 p. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/14740/1052bc459edd47acb887089816ec199d/ISO-7822-1990.pdf> (accessed 23.03.2026).
17. Saenz-Castillo D., Martín M.I., Calvo S., Rodriguez-Lence F., Güemes A. Effect of processing parameters and void content on mechanical properties and NDI of thermoplastic composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 121, pp. 308–320. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.03.035.
18. Lee D.H., Lee W.I., Kang M.K. Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process. *Composites Science and Technology*, 2006, vol. 66 (16), pp. 3281–3289. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.07.008.
19. Pupin C., Ross A., Dubois C., Rietsch J.-C., Vernet N., Ruiz E. Formation and suppression of volatile-induced porosities in an RTM epoxy resin. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 94, pp. 146–157. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.12.006.



20. Wong D., Anwar M., Debnath S., Abdullah A.H., Izman S., Pramanik A. Degassing process influence on tensile strength of neat E132 epoxy polymeric materials. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1026, pp. 129–135. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1026.129.

21. Choi J., Jung H., Han S. The effect of porosity on the thermal conductivity of highly thermally conductive adhesives. *Polymers*, 2023, vol. 15 (14), p. 3083. DOI: 10.3390/polym15143083.

22. Guo Y., Ruan K., Shi X., Yang X., Gu J. Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: a review. *Composites Science and Technology*, 2020, vol. 193, p. 108134. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108134.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).