

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПАКТНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ФИДСТОКОВ С МАЛЫМИ ДОБАВКАМИ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2024 г. А. М. Столин¹, О. А. Аверичев^{1,*}, П. А. Столин¹,
член-корреспондент РАН М. И. Алымов¹

Поступило 05.12.2024 г.

После доработки 14.01.2025 г.

Принято к публикации 21.01.2025 г.

В работе впервые получены компактные заготовки из гранулированного металлополимерного композита на основе хромомолибденовой стали с малыми добавками полимерного связующего методом твердофазного прессования. Уплотнение данной смеси и ее прессуемость рассматриваются как нестационарные процессы деформирования, которые зависят от реологического поведения материала, меняющегося во времени. Изучена кинетика процесса прессования гранулированной смеси в компактные заготовки в специальной пресс-форме путем нагружения в режиме постоянной скорости деформации. Получены реологические кривые зависимостей напряжения от деформации, с помощью которых определено время начала прогрессивного нарастания напряжений. Найдены рациональные режимы получения компактных заготовок из исходной смеси, определены плотность, пористость и прочность на сжатие полученных образцов.

Ключевые слова: металлополимерный фидсток, хромомолибденовая сталь, твердофазная технология, тиксотропия, реология

DOI: 10.31857/S2686953524060019, EDN: BOYRNB

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в порошковой металлургии активно развиваются технологии инъекционного формования деталей со сложной геометрической конфигурацией, или MIM-технология, (*Metal Injection Molding*), а также ее аналог по сути – PIM-технология (*Powder Injection Molding*), которые позволяют эффективно получать малогабаритные изделия сложного профиля с высокими показателями точности из порошково-полимерных смесей [1–4]. Как правило, такие смеси состоят из металлических гранул заданного состава и полимерного связующего, обеспечивающего пластичность всей композиции при формообразовании, и в мировой литературе их принято называть *фидстоками*. Данная технология объединяет в себе достоинства порошковой металлургии [5] и технологии литья [6]: технология порошковой металлургии позво-

ляет точно соблюдать химический состав материала, а литье под давлением позволяет получать изделия сложной формы и высокой плотности за счет инъекции этой смеси в полость литейной формы с последующим отверждением отливки, благодаря чему усадка материала при остывании может быть минимальной. Применение MIM-технологии позволяет получать качественные детали сложной формы, не прибегая к дорогостоящим традиционным методам обработки [7–9]. Такой подход может быть экономически выгодным в различных областях машиностроения, в которых требуется выпуск мелкосерийной партии сложнопрофильных компонентов в кратчайшие сроки.

Особенность переработки фидстоков методом инъекционного литья заключается в необходимости обеспечения заданного состава исходной смеси. Как правило, для осуществления формования изделий из фидстоков требуется определенная, строго заданная морфология исходных гранул в узком диапазоне дисперсности. Существующая технология переработки фид-

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

*E-mail: averichev@ism.ac.ru

стоков включает в себя стадию нагрева, которая необходима для расплавления связующего и перевода фидстока в пластический режим перед процессом инъекции материала в литейную форму. Чем меньше продолжительность этой стадии и ниже температура, тем выше энергоэффективность всего процесса. Другим немаловажным фактором, влияющим на качество получаемых изделий, является процесс последующего охлаждения материала в литейной форме, который происходит неравномерно в силу анизотропии геометрических параметров заготовки, что приводит к неравномерной усадке образца и образованию макропор [10]. Как следствие, снижается механическая прочность заготовки и получаемого из нее изделия. Переход к новым технологическим процессам переработки фидстоков, который бы исключал описанные выше недостатки, заключается в обработке фидстока давлением в твердой фазе. Применение данного метода позволяет использовать свойство некоторых материалов изменять свою объемную вязкость под действием сдвиговых напряжений и температуры, что делает данный метод схожим с тиксоформованием, при котором компактирование изделий происходит при температуре выше ликвидуса основной фазы [11–13].

Выбор технологических режимов формования композиционного материала в высокой степени зависит от соотношения содержащихся в нем твердой и пластичной фаз. При формовании фидстоков режим их компактирования зависит от массовой доли пластического связующего, которое было введено при его приготовлении. Если связующего в фидстоке достаточно, то реализуется режим пластического деформирования материала. Технологические трудности при формовании изделий возникают при приготовлении фидстоков, в которых массовая доля металла значительно превышает массовую долю полимера. При таком соотношении компонентов пластического режима деформирования не реализуется, вместо этого происходит вязкоупругое деформирование исходных гранул, сопровождающееся нелинейным режимом уплотнения.

При реализации твердофазного метода переработки полимеров особое внимание уделяется вопросу реологического поведения фидстоков, их способности к пластическому течению в процессе формования [14]. Важным вопросом является установление зависимости между давлением прессования и плотностью прессовок. На основе этой зависимости проводится оценка уплотняемости порошков, что позволяет выбрать необхо-

димые параметры прессования, обеспечивающие заданное значение плотности. На практике с этой целью проводится большое число опытов на гидравлических прессах в специальных пресс-формах в условиях статического нагружения в режиме постоянного давления. При этом возникает неопределенность, связанная с тем, что процесс уплотнения является нестационарным и степень уплотнения непрерывно меняется со временем [15]. Поэтому плотность, соответствующая заданному давлению, зависит от длительности процесса прессования, а ее максимальное значение зависит также от времени выдержки. Применительно к фидстокам реологический подход позволяет установить механизм деформирования композиционного порошкового материала, не прибегая к множеству опытов, определить их реологические свойства и найти требуемые значения давления, обеспечивающие наиболее высокие значения плотности. В рамках этого подхода уплотнение порошков и их прессуемость рассматриваются как нестационарные процессы деформирования, которые зависят от реологических факторов [16]. В зависимости от массового соотношения дисперсного наполнителя и полимерного связующего реологическое поведение фидстоков существенно изменяется, в результате чего меняются технологические режимы их компактирования и переработки.

Таким образом, для оценки применимости твердофазной технологии при переработке фидстоков с малыми добавками полимерного связующего необходимо изучить закономерности их реологического поведения при формовании. Для этого в настоящей работе поставлена задача исследования реодинамики и кинетики процесса уплотнения модельного фидстока при холодном одноосном прессовании в специальной пресс-форме. В качестве модельного материала выбрана полимерно-гранулированная смесь на основе стального порошка, используемая в аддитивных технологиях в промышленных масштабах.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Характеристика объектов исследования. Объектом исследования в настоящей работе стал коммерчески доступный гранулированный фидсток на основе сплава 38ХМА (хромомолибденовая сталь) с воск-полипропиленовым полимерным связующим. Данный вид сплава является востребованным порошковым материалом для приготовления фидстоков с целью производства

деталей по МИМ-технологии [17]. Расчетная плотность компакта для данного материала составляет $5.13 \pm 0.1 \text{ г см}^{-3}$.

Реология фидстока. Исследование реологических характеристик проводилось на универсальной испытательной машине РЭМ-20-А-1-4 (ООО “Метротест”, Россия) в режиме одноосного прессования в закрытой пресс-форме. Данная установка позволяет производить нагружение образцов с постоянной заданной скоростью ($V = \text{const}$), в результате чего строится график зависимости нагрузки от времени $F(t)$. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Как показано в работе [12], ключевым является не только выбор метода подготовки фидстока, но и конструкция, а также материал пресс-формы, от которых зависит выбор режима термической обработки. В цилиндрический стальной стакан 1 установлен верхний подвижный шток 2, который совместно с нижним статичным штоком 3 формирует загрузочную камеру 4 диаметром $d = 12 \text{ мм}$, в которую предварительно загружены гранулы фидстока 5. Верхний подвижный шток приводили в движение плунжером пресса при постоянной скорости нагружения $V_n = 0.1 \text{ мм мин}^{-1}$, предел максимальной нагрузки установлен на значении $P_{\text{max}} = 20 \text{ кН}$. Обеспечиваемая гарантированная точность динамометра составляла 1%. Общая масса навески $m_n = 20 \text{ г}$. Эксперимент проводился при температуре $T = 298 \text{ К}$. Подготовленную пресс-форму с исследуемой системой устанавливали под плунжер испытательной машины, которая в процессе нагружения отображает изменение давления в образце с течением времени, т.е. формирует график зависимости “давление–время”.

При исследовании прессуемости данного материала важными параметрами являются исходная и текущая высота насыпного слоя h . По ним отмечается изменение высоты заготовки при нагружении, из которой в свою очередь определяют результирующую деформацию и текущую плотность. Следует отметить, что для рассматриваемого типа исходных гранул насыпная плотность не нормировалась, поскольку варьировалась в широком диапазоне из-за высокого разброса по морфологии и размеру частиц в зависимости от конкретной засыпки. Для навески массой 20 г среднее значение насыпной плотности составило $2.1 \pm 0.2 \text{ г см}^{-3}$.

Изучение влияния температурного фактора на реологическое поведение фидстока. Предварительный подогрев фидстока, помещенного в камеру 5 пресс-формы, производился в муфельной

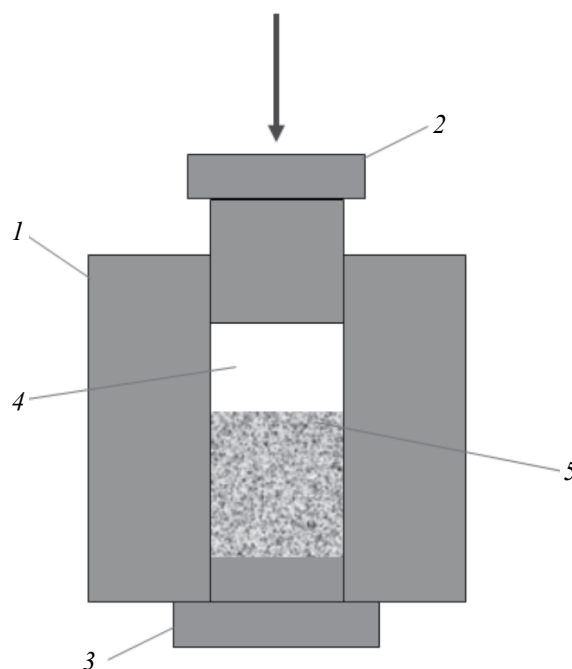


Рис 1. Схема формирования фидстока по твердофазной технологии: 1 – стакан, 2 – верхний шток, 3 – нижний шток, 4 – загрузочная камера, 5 – фидсток.

печи СНОЛ-2.2,5.1,8/10 (Термикс, Россия) при атмосферном давлении. Температуры подогрева выбирались от комнатной и до предела плавления полимерного связующего – от 25 до 200°C соответственно. При заданной температуре фидсток выдерживали в течение 5 мин, после чего производилось нагружение плунжером пресса. При изучении формуемости материала при повышенных температурах диаметр исходной заготовки увеличивали до $d = 25 \text{ мм}$ для более явного выявления формуемости, соответственно, масса навески увеличивалась до $m = 50 \pm 0.1 \text{ г}$. Время выдержки под нагрузкой $T_b = 10 \text{ с}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результат исследования реологического поведения фидстока на основе хромомолибденовых стальных гранул 38ХМА на испытательной машине сжатия при постоянной скорости нагружения плунжера пресса $V_n = 0.1 \text{ мм с}^{-1}$ представлен на рис. 2. На данном графике исходные для установки значения нагрузки $F(t)$ перестроены в более информативные для определения прессуемости значения напряжений $\sigma(\tau)$, которые рассчитывали по формуле:

$$\sigma = P/S_k, \quad (1)$$

где σ – результирующее напряжение на шихтовую заготовку, P – нагрузка, создаваемая плун-

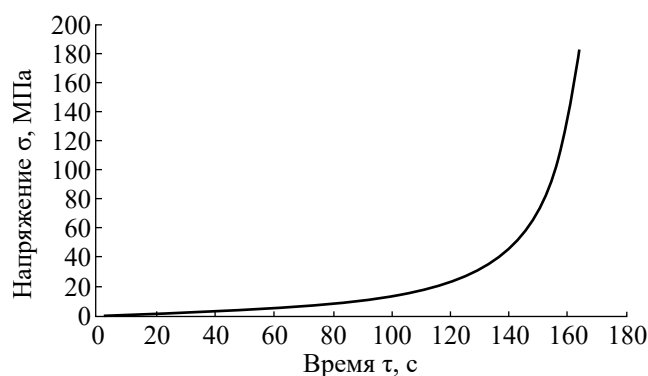


Рис. 2. Диаграмма нагружения фидстока 38ХМА в координатах $\sigma = f(\tau)$.

жером испытательной машины, S_k — площадь поверхности нагружения, задаваемая диаметром рабочей камеры пресс-формы.

Для изучения реологического поведения материала полученная кривая перестраивалась в координатах “давление прессования—изменение высоты заготовки”, т.е. $P = f(\Delta h)$. Поскольку скорость движения плунжера пресса постоянна, в каждой точке кривой стало возможным определить изменение высоты насыпного слоя Δh с течением времени как:

$$\Delta h = h_0 - h_t, \quad (2)$$

где h_0 — начальная высота насыпного слоя, h_t — высота прессовки в заданный момент времени.

Полученную диаграмму перестраивали в реологическую кривую одноосного прессования гранул в координатах “напряжение—деформация”, т.е. $\sigma = f(\epsilon)$. Используя эту кривую, можно определять реологические характеристики материала, например, модуль упругости при сжатии, а также выявлять механизм деформирования и находить оптимальные условия формуемости. Для этого степень деформации ϵ прессуемой заготовки в зависимости от времени определяли по формуле:

$$\epsilon_\tau = \frac{h_0 - h_t}{h_0}, \quad (3)$$

где ϵ_τ — степень деформации в заданный момент времени. Формула (3) дает представление о степени деформации образца интегрально, т.е. сравниваются только начальные и конечные значения высоты заготовки.

Диаграмма одноосного прессования фидстока на основе 38ХМА в координатах “напряжение—деформация” представлена на рис. 3.

Как видно из диаграммы, в начале процесса нагружения, вплоть до 6 МПа, преобладает об-



Рис. 3. Реологическая кривая фидстока 38ХМА.

ласть квазиупругого деформирования гранул шихты 38ХМА, при которой наблюдается практически линейная зависимость увеличения напряжения с ростом степени деформирования шихтовой заготовки, степень деформации ϵ в этой области достигает 13% (рис. 3, область I). На этой стадии увеличение деформации происходит за счет свободного перемещения частиц порошка и заполнения пустот между ними, при этом образуется более полный контакт между отдельными частицами. Далее, по мере движения пуансона, происходит нарастание скорости прироста напряжений (область II). Данная стадия соответствует уже нелинейному увеличению напряжения по мере прироста степени деформации. На этой стадии перемещение частиц происходит за счет их аккомодации между собой, и в значительной степени проявляются силы сухого трения между частицами. Эта стадия требует больших усилий для дальнейшего уплотнения материала, и здесь можно наблюдать начало прогрессивного нарастания напряжений внутри образца. Область в интервале 36–43 МПа представляет технологический интерес, так как здесь в материале накапливается значительная доля пластической деформации ($\Delta\epsilon > 25\%$), что может быть эффективно использовано для дальнейшей переработки заготовок в изделие. Однако материал находится в пластическом состоянии не во всех точках, поэтому возникает некоторая неопределенность с выбором условия пластичности для гранулированных материалов исходя из графика. Для разрешения этой неопределенности повышали усилия прессования, когда с увеличением нагрузки наблюдается стремление кривой к вертикальной асимптоте. Данному процессу явно соответствует область III на диаграмме, где уже в полной мере происходит прогрессивное нарастание напряжений внутри образца, которое характеризуется минимальным приростом

деформации при критическом росте напряжений вплоть до 183 МПа. При этом происходит деформация отдельных гранул либо отдельных зон внутри них, разрушение и дробление выступов на поверхности частиц. В области III малое увеличение степени уплотнения ($\Delta\varepsilon \sim 3\%$) требует критических напряжений, которые в отдельных случаях могут приводить к нарушению целостности заготовки. При этом должно происходить уплотнение фидстока до значений плотности, близких к плотности компакта.

Для оценки кинетики уплотнения гранулированного материала была построена диаграмма зависимости давления от плотности (рис. 4). Относительная плотность заготовки в каждый момент времени нагружения рассчитывалась по формуле:

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{к}}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – текущая плотность заготовки в точке, $\rho_{\text{к}}$ – расчетная плотность компакта.

Из графика видно, что до нагрузки 20 МПа наблюдается практически линейная зависимость относительной плотности от давления: часть ветви до $\rho_{\text{отн}} = 0.85$. При превышении этого значения относительная плотность заготовки увеличивается экспоненциально с ростом давления, вплоть до максимальных значений для установки, т.е. наблюдается прогрессивное нарастание напряжений в образце. Скорость уплотнения гранул при этом увеличивается, что, по-видимому, связано с их растрескиванием и распадом на более мелкие кристаллиты. При достижении давления в образце 183 МПа относительная плотность заготовки $\rho_{\text{отн}}$ достигает значения 0.97. Можно предположить, что выше значений напряжений, соответствующих этой относительной плотности, будут происходить такие структурные превращения, в результате

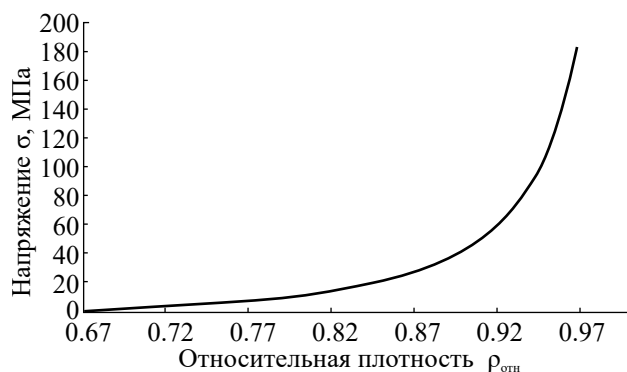


Рис. 4. Кинетика уплотнения фидстока 38ХМА.

которых материал начинает пластически течь. Для пресс-формы с $d = 12$ мм не удалось увеличить нагрузку из-за опасности поломки штока. Однако в случае пресс-форм с большим диаметром имеет смысл изучить прессуемость данного материала при более высоких напряжениях.

Для всесторонней оценки прессуемости рассматриваемого материала были проведены эксперименты по прессованию исходных гранул при различных начальных температурах подогрева смеси. Такие эксперименты дают представление о влиянии температурного фактора на реологическое поведение материала, позволяют выявить нелинейности процесса, а также определить так называемые технологические окна, необходимые для получения изделий прессованием. На рис. 5 представлены результаты реологического поведения материала после нагрева гранул и последующего нагружения плунжера до нагрузки 60 кН, напряжение при прессовании составляло 132 МПа. Предварительный подогрев исходной шихты осуществлялся непосредственно перед началом прессования так, чтобы температура фидстока изменялась не более, чем на 5% от заданной.

По мере увеличения температуры подогрева степень деформации при одноосном закрытом прессовании увеличивается сперва немонотонно, резко вырастая при повышении температуры до 50°C, при этом $\varepsilon = 0.38$ (рис. 5а). Далее при-

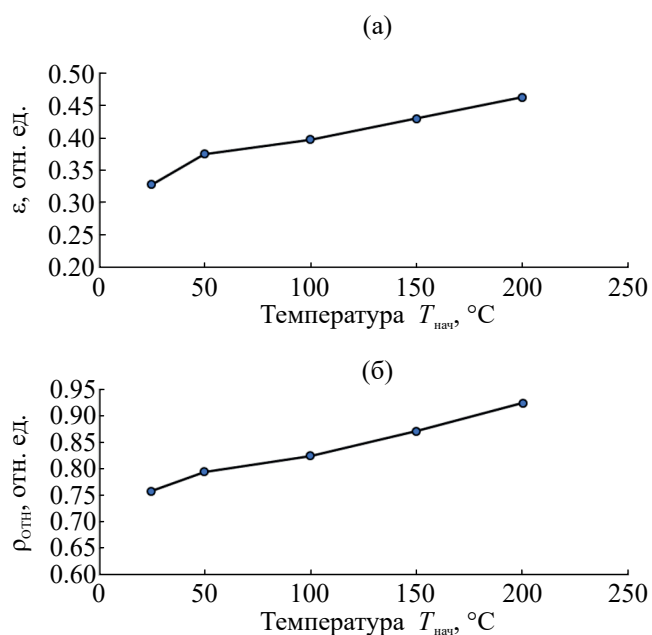


Рис. 5. Зависимость степени деформации (а) и относительной плотности (б) фидстока 38ХМА от температуры начального подогрева.

рост деформации происходит линейно вплоть до 200°C, ее значение при этом увеличивается до 0.46. Относительная плотность $\rho_{\text{отн}}$ при 50°C равна 0.8 (рис. 5б), что на 23% выше, чем при комнатной температуре, а при 200°C это значение вырастает до 0.92, что почти на 40% выше относительной плотности заготовки, скомпактированной при комнатной температуре. Следует отметить, что воск-полипропиленовое полимерное связующее при температуре выше 185°C начинает плавиться (крайняя точка на рис. 5б соответствует 200°C). Этот факт не является однозначным технологическим препятствием для компактирования фидстока при 200°C, однако последующее увеличение температуры подогрева может приводить к затруднениям из-за налипания гранул к стенкам пресс-формы при загрузке. Как будет показано далее, полученное значение плотности заготовки не является пределом и может быть увеличено дополнительно.

Результат исследования формуемости предварительно спрессованных в заготовки фидстоков путем формования в режиме свободного сжатия в зависимости от температуры предварительно подогрева представлен на рис. 6. Максимальное усилие плунжера прессы составляло 15 кН, начальная температура подогрева варьировалась от 50 до 200°C. Формуемость оценивалась по степени деформации заготовки после снятия нагрузки по формуле:

$$\varepsilon = \frac{S_{\text{к}} - S_{\text{н}}}{S_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{н}}$ — площадь сечения заготовки после одноосного закрытого прессования, $S_{\text{к}}$ — площадь сечения материала после нагружения при свободном сжатии.

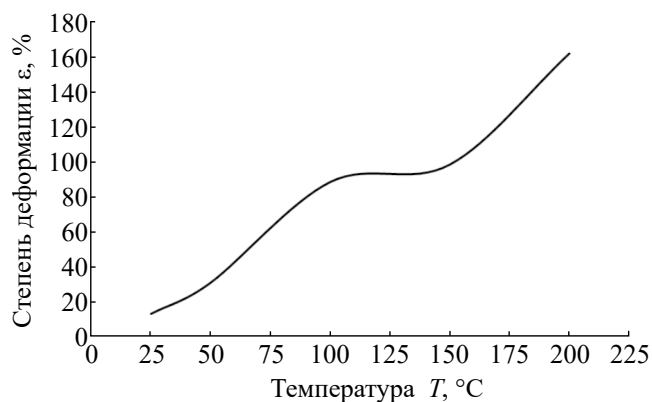


Рис. 6. Зависимость степени формуемости цилиндрических заготовок при свободном сжатии в зависимости от температуры начального подогрева.

При увеличении температуры подогрева с 50 до 100°C происходит монотонное увеличение степени деформации заготовки почти в 6 раз, по сравнению с исходными значениями при комнатной температуре, при этом степень деформации становится равной 88% (рис. 6). При дальнейшем повышении температуры подогрева формуемость материала резко замедляется: в интервале температур 100–150°C прирост формуемости составил 11%. При продолжении нагрева и увеличении температуры подогрева до 200°C формуемость фидстока резко возрастает на 65%. Таким образом, зависимость реологических параметров данного материала от температуры носит немонотонный характер. Полученные результаты говорят о том, что при формовании фидстока проявляются тиксотропные свойства материала, заключающиеся в нелинейной зависимости степени его деформации от параметра процесса прессования — температуры. Это означает, что подобный характер поведения можно ожидать и при изменении давления формования, причем в широком диапазоне, поскольку тиксотропия свойств, как правило, инвариантна к параметрам состояния (P , τ). Более того, такие исследования необходимы в дальнейшем, поскольку позволят выявить тиксотропию свойств рассматриваемого материала в зависимости от обоих факторов.

Прочность на сжатие образцов, скомпактированных при $T = 25^\circ\text{C}$, варьируется от 15 до 19 МПа, характер кривых нагружения указывает на хрупкость образцов. В то же время, измерить макротвердость полученных заготовок стандартными методами индентирования не представляется возможным, поскольку при погружении индентора в материал проявляются его вязкоупругие свойства.

Пример полученных по твердофазной технологии заготовок представлен на рис. 7.

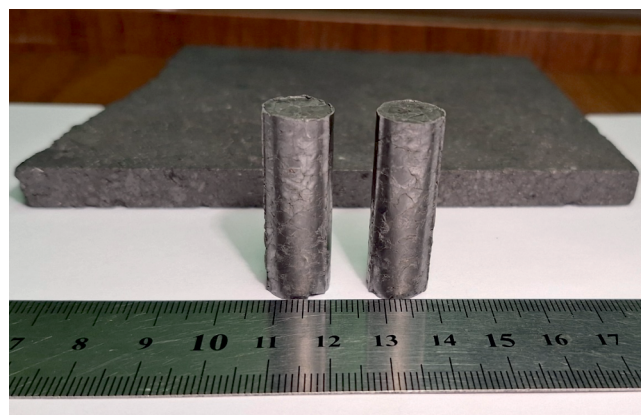


Рис. 7. Примеры заготовок, полученных по твердофазной технологии.

В зависимости от назначения и применения получаемых компактных заготовок возможно последующее удаление полимерной связки термическими или химическими методами. Однако в определенных случаях связка может быть сохранена, если ее малый массовый процент в смеси существенно не влияет на прочностные характеристики изделия, а в некоторых случаях ее наличие может быть даже полезным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены реологические характеристики фидстока на примере гранулированной шихтовой смеси 38ХМА с полимерным воск-полипропиленовым связующим при твердофазном формовании в режиме холодного одноосного прессования. Показана возможность получения цельных компактных заготовок данным методом.

Получены кривые зависимостей напряжения σ в образце от времени компактирования τ и от степени деформации ϵ материала при нагружении в режиме постоянной скорости. Начало прогрессивного нарастания напряжений в образце происходит в области давлений 36–43 МПа, после чего происходит экспоненциальный рост напряжений, а относительная плотность заготовки достигает значений, близких к единице. Найден интервал напряжений в материале, при котором возможно получение заготовки с остаточной пористостью менее 3% и минимальной дефектностью поверхности. Плотность компакта, полученного по твердофазной технологии, составила 4.97 г см^{-3} .

Показана нелинейность реологических свойств рассматриваемого фидстока, заключающаяся в немонотонной зависимости сдвиговой вязкости материала от температуры его формования, при этом существует область значений подогрева фидстока, при которых степень деформации достигает 160%.

Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности использования процесса твердофазного прессования для получения компактных фидстоков с однородным распределением плотности по объему материала. В результате исключения стадии литья практически не происходит нежелательной усадки материала после его остывания, благодаря чему материал становится более плотным. Учитывая указанные преимущества твердофазной технологии, есть все предпосылки для эффективного использования полученных фидстоков в промышленности. В настоящее время остаются нерешенными ряд задач применительно к твердофазным мето-

дам получения изделий. В частности, требуется определить оптимальные режимы процессов твердофазного прессования и штамповки, разработать методику инженерного расчета рабочих размеров технологической оснастки с учетом закономерностей объемной усадки материала.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена за счет средств бюджета института.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hausnerova B. Powder injection moulding – an alternative processing method for automotive items. In: New trends and developments in automotive system engineering. Chiaberge M. (Ed.). 2011. P. 129–146. <https://doi.org/10.5772/13358>
2. Koivuluoto H., Coleman A., Murray K., Kearns M., Vuoristo P. // J. Therm. Spray Technol. 2012. V. 21. P. 1065–1075. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9790-x>
3. Мячин Ю.В., Даренская Е.А., Ваулина О.Ю., Буякова С.П., Турунтаев И.В., Кульков С.Н. // Перспективные материалы. 2016. № 7. С. 73–78.
4. Васильев А.И., Путырский С.В., Коротченко А.Ю., Анисимова А.Ю. // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). С. 16–27. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-16-27>
5. Ramakrishnan P. Automotive applications of powder metallurgy. In: Advances in powder metallurgy. Chang I., Zhao Y. (Eds.) Woodhead Publishing Ltd., 2013. P. 493–519. <https://doi.org/10.1533/9780857098900.4.493>
6. Gu F., Hall P., Miles N.J. // J. Cleaner Prod. 2016. V. 137. P. 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.028>
7. Погодина Е. // Пластикс. 2013. № 6. С. 34–36.
8. Семенов А.Б., Муранов А.Н., Куцбах А.А., Семенов Б.И. // Вестник РУДН. Сер.: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 4. С. 407–425. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-407-425>
9. Пархоменко А.В. // Вестник СамГТУ. Сер.: Технические науки. 2013. № 2. С. 91–98.
10. Муранов А.Н., Куцбах А.А., Семенов А.Б., Семенов Б.И. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2019. Т. 25. № 1. С. 76–86.

11. *Gonzalez-Gutierrez J., Stringari G.B., Megen Z.M., Oblak P., von Bernstorff B.S., Emri I.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 602. № 1. P. 012001.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/602/1/012001>
12. *Бинь Н.Т., Джиндо Н.А., Семенов А.Б., Семенов Б.И.* // *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2012. № 9 (9). С. 148–165.
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-9-380>
13. *Семенов А.Б., Муранов А.Н., Семенов Б.И.* // *Грузовик.* 2017. Т. 10. С. 3–6.
14. *Котомин С.В., Шабеко А.А., Френкин Э.И., Коротченко А.Ю., Тверской М.В., Хилков Д.Э.* // *Труды Кольского научного центра РАН.* 2018. Т. 9. № 2–1. С. 305–310.
<https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.305-310>
15. *Столин А.М., Хохлов А.В.* // *Вест. Моск. ун-та. Сер. 1: Математика. Механика.* 2022. № 5. С. 31–39.
16. *Столин А.М., Стельмах Л.С., Стельмах Э.В.* // *Теор. основы хим. технол.* 2023. Т. 57. № 1. С. 117–124.
<https://doi.org/10.31857/S0040357123010141>
17. *Ye H., Liu X.Y., Hong H.* // *J. Mater. Process. Technol.* 2008. V. 200. №. 1–3. P. 12–24.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.066>

Dedicated to the jubilee of Vyacheslav Buznik, Academician of the RAS

FEEDSTOCK PROCESSING WITH SMALL ADDITIVES OF POLYMER BINDER BY SOLID-PHASE TECHNOLOGY

A. M. Stolin^a, O. A. Averichev^{a,#}, P. A. Stolin^a, Corresponding Member of the RAS M. I. Alymov^a

^a*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russian Federation*

[#]*E-mail: averichev@ism.ac.ru*

In this paper we consider the possibility of obtaining compact blanks and products from a granular metal-polymer composite based on chromium-molybdenum steel with small additives of a polymer binder by solid-phase pressing. The mixture compaction and its compressibility are considered as non-stationary deformation processes that depends on the changing over time rheological behavior of the material. The kinetics of pressing a granular mixture into compact blanks in a special mold by loading at a constant deformation rate has been studied. Rheological curves of stress–strain dependences are obtained, the time of the onset of progressive stress increase is determined. Optimal parameters of the blanks compacting from the green mixture have been found. Thus, it makes possible to obtain products with minimal porosity, and the physical and mechanical parameters of compacts, such as porosity, compressive strength and microhardness, have been studied.

Keywords: metal polymer feedstock, chromium-molybdenum steel, solid-phase technology, thixotropy, rheology