

## Материаловедение

УДК 621.762

### О РОЛИ ЭНЕРГИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ И СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ ЧАСТИЦ

*С.Е. Алексенцева, И.В. Захаров, А.Л. Кривченко*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Проведен анализ влияния параметров соударения на процесс сверхглубокого проникновения частиц. Определен параметрический принцип, выявляющий возможность сверхглубокого проникновения частиц. Показана роль ударной волны продуктов детонации как фактор предварительного напряжения кристаллической решетки для последующего внедрения частиц. Разработан алгоритм энергетического баланса при сверхглубоком проникании. Предложен механизм сверхглубокого проникания за счет разрыва межмолекулярных и межатомных связей при внедрении частиц. Сделано обоснование размерного интервала проникающих частиц при сверхглубоком проникании.*

**Ключевые слова:** ударные волны, разрушение межатомных связей, модель сверхглубокого проникания, поток высокоскоростных дискретных частиц.

На рубеже 80-х и 90-х годов XX века был обнаружен эффект сверхглубокого проникания ударников малого размера на глубины, в 100 и даже 1000 раз превышающие размер ударников, причем эффект реализуется в нестрогом размерном интервале ударников порядка 1–100 мкм. Поэтому в качестве ударников используют порошковые дискретные частицы. Эффект получил название сверхглубокого проникновения (СГП) частиц. Данный эффект реализован при метании ударников в виде потока плотностью около  $1 \text{ г/см}^3$  за счет энергии взрыва в установке взрывного ускорителя. Скорость метания составляет 1–3 км/с, давление соударения порядка 10–15 ГПа. Впервые для метания частиц процесса использован кумулятивный заряд, в кумулятивной выемке которого располагался рабочий объем метаемого порошка [1, 2], а также торцевой способ [3–5].

Основными факторами, характеризующими эффективность пробивного действия ударников любого типа, являются кинетические и геометрические параметры ударника, а также соотношение прочности (плотности, твердости) ударника и преграды. Реальность и место СГП частиц видны, если рассматривать процесс как часть процессов в линейке изменения скоростей, масс и площадей взаимодействия с учетом прочностных характеристик ударника и преграды. Ме-

---

*Светлана Евгеньевна Алексенцева (к.ф.-м.н., доц.), доцент кафедры «Технология твердых химических веществ».*

*Игорь Владиславович Захаров, ведущий инженер.*

*Александр Львович Кривченко (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Защита в чрезвычайных ситуациях».*

ханизм сверхглубокого проникания проявляется в суммарном воздействии узкого критического интервала скоростей и размеров частиц и химического элементарного состава самих частиц, наложенных на добавочное ударно-волновое воздействие продуктов детонации (ПД). Предварительно рассмотрим данные процессы по возможности изолированно.

Кинетическая энергия ударника в общем случае считается основной характеристикой поражающего действия. В основном все модели соударения высокоскоростных тел с преградами основаны на положении, что объем кратера  $V_K$  или объем выбиваемого материала как конечный результат работы кинетической энергии прямо пропорционален кинетической энергии удара снаряда  $E_{уд}$ , т. е.  $V_K \sim E_{уд}$ . Абстрагируясь от конкретной формы кратера, приближенно можно считать сопоставимыми по величине условное среднее поперечное сечение кратера по глубине и площадь в поперечнике ударника  $S$ . Тогда имеем пропорциональность между глубиной пробития преграды  $L_K$  и удельной энергией удара:

$$V_K / S \sim E_{уд} / S,$$

следовательно,

$$L_K \sim E_{уд} / S.$$

Например, кинетическая энергия для шарообразных ударников из прочного элемента вольфрама (плотность  $\rho = 19300 \text{ кг/м}^3$ ) диаметром  $d$  разных размеров (16; 4 и 0,1 мм) в скоростном интервале 2–8 км/с отличается внутри интервала в сотни раз, а при сравнении кинетической энергии ударников разных размеров – в миллионы раз (табл. 1).

Таблица 1

**Сравнение кинетической энергии и энергии, распределенной на площади поперечного сечения ударника**

Диаметр ударника из вольфрама $d$ , мм	Масса ударника $m$ , г	Кинетическая энергия $E$ , Дж, в интервале скоростей 2–8 км/с	Удельная кинетическая энергия $E_S$ , Дж/мм <sup>2</sup> , в интервале скоростей 2–8 км/с
16	41,4	$\sim 80 \cdot 10^3 - 1300 \cdot 10^3$	398,09 – 6468,95
4	0,65	$\sim 2,6 \cdot 10^3 - 21 \cdot 10^3$	207,0 – 1671,97
0,1	0,00001	$\sim 0,02 - 0,32$	2,55 – 40,76

Так, кинетическая энергия  $E = mv^2/2$  ( $m$  – масса ударника,  $v$  – скорость) или плотность энергии в объеме  $E = \rho v^2/2$  ( $\rho$  – плотность ударника) являются характеристиками, не учитывающими вектор приложения энергии и градиент распределения в области действия. Поэтому не только величина кинетической энергии обеспечивает пробивное действие ударника. Значительную роль играет общее лобовое сопротивление в преграде или площадь поперечного сечения ударника. Величина удельной кинетической энергии, распределенная на площади взаимодействия ударника и преграды, в наших оценках делает сопоставимыми характеристики пробивного действия ударников разных размеров (см. табл. 1, рис. 1).

В первом приближении используем критериальный подход для оценки пробивной силы ударника [3]. По критериальному подходу сравниваются критерий ударника и критерий преграды. Преграда является пробиваемой, если критерий ударника больше или равен критерию преграды  $K_{уд} \geq K_{ПРЕГ}$ . В качестве критерия в основном принимается кинетическая энергия или удельная кинетическая энергия.

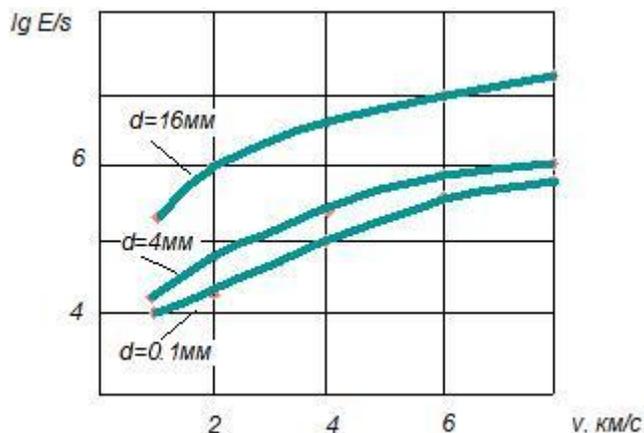


Рис. 1. Удельная энергия ударников из вольфрама диаметром 0,1, 4 и 16 мм

Из сравнения данных кинетической и удельной энергии ударников (см. табл. 1 и 2) видно, что частицы размером около 100 мкм и скоростью 2–3 км/с могут пробить непрочные и даже небронированные преграды. Из практики, например, известно, что пуля автомата Калашникова, имеющая кинетическую энергию 2048 Дж или распределенную на площади соударения с преградой 44,93 Дж/мм<sup>2</sup>, пробивает строительную сталь марки Ст.3 толщиной до 10–11 мм.

Таблица 2

#### Критерии преград

Тип преграды	Кинетическая энергия, Дж	Удельная кинетическая энергия, Дж/мм <sup>2</sup>
Непрочные преграды	100	1
Небронированная техника	300–1000	3–10
Легкобронированная техника	2000–5000	20–50

В общем глубина проникания ударника зависит от площади его поперечного сечения в зоне постоянной прочности (плотности, твердости) ударника и преграды (рис. 2).

Если принять постоянной скорость метания ударника и его массу, то при уменьшении площади поперечного сечения ударника, т. е. уменьшении лобового сопротивления, будет увеличиваться глубина пробития преграды до критического снижения энергии внедряющегося ударника.

Если принять постоянными массу и площадь поперечного сечения ударника (рис. 3), то в нижнем скоростном интервале имеют место процессы деформации ударника – зона *A*. Далее повышение скорости приводит к увеличению пробития преграды – зона *B*. Затем дальнейшее повышение скорости вызывает дробление ударника и, следовательно, снижение глубины пробития преграды – зона *C*. В области увеличения количества фрагментов раздробленного ударника и повышения скорости медленно увеличивается глубина пробития – зона *D* [6]. При дроблении и уменьшении массы появляется разновекторность кинетической энергии и глубина пробития снижается.

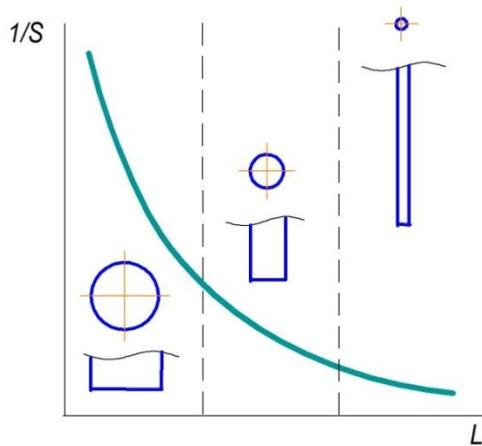


Рис. 2. Общая зависимость глубины проникновения в преграду ударника от его площади поперечного сечения в области их постоянных прочностных параметров

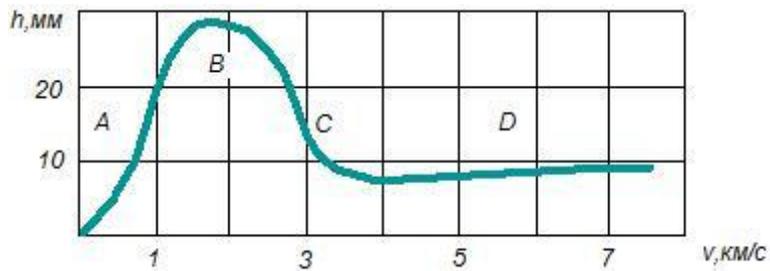


Рис. 3. Зависимость глубины внедрения ударника от скорости метания

Если увеличивать площадь поперечного сечения и скорость метания ударника, то в нижнем скоростном интервале наибольшую глубину пробития дадут ударники с большой площадью поперечного сечения и большой массой. Далее увеличение глубины пробития происходит только с уменьшением площади поперечного сечения и массы ударника. Таким образом, получаем рабочую зону размеров ударников с максимальной глубиной проникания (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость максимальной глубины пробития от диаметра ударника

Суммируя действие всех главных факторов, формулируем принцип пробивания преграды при СГП частиц – «принцип калибров»: площадное поверхностное разрушение переходит в сверхглубокое туннельное пробивание приблизительно того же объема.

Эффект СГП частиц состоит из совокупности двух процессов: ударного воздействия на заготовку газообразных ПД и проникающего действия потока порошковых частиц. Действие процессов параллельно и одновременно. Поэтому исследование вклада энергий ударной волны (УВ) газообразных продуктов детонации и кинетической энергии удара метаемых частиц является необходимым для описания энергодобавки процесса СГП.

Рассмотрим вклад УВ газообразных продуктов детонации в реализацию СГП частиц. Скорость детонации используемого для метания взрывчатого вещества  $D = 6$  км/с, а время распространения ударной волны  $10^{-5} - 10^{-6}$  с. При разлете со свободной поверхности продукты детонации дополнительно увеличивают скорость  $W = D + \Delta'$ . Скорость метания частиц 1–3 км/с, при этом время подхода потока частиц к преграде зарегистрировано экспериментально и составляет 10–12 мкс и более. Происходит обгон продуктами детонации летящих частиц и опережающее взаимодействие ПД с материалом преграды (давление УВ продуктов детонации  $\sim 1$  ГПа и более).

Теоретическое исследование процесса сверхглубокого проникновения частиц (СГП) выявило как одну из основных роль ударной волны в процессе внедрения частиц в преграду. Фактически процесс СГП представляет собой ударное воздействие частиц, наложенное на воздействие продуктов детонации на металлическую заготовку.

При воздействии на материал преграды ПД ударная волна несет импульс энергии  $E_{УВ}$ , тем самым прибавляя к имеющейся энергии кристаллической решетки заготовки  $E_O$  дополнительный импульс  $E_{УВ}$  и получая суммарное напряжение решетки  $E_{НАП}$ . При этом в момент воздействия ПД на кристаллическую решетку общая энергия  $E_{НАП} = E_O + E_{УВ}$ . Тем самым  $E_{УВ}$  для кристаллической решетки становится источником увеличения тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, частичной пластификацией решетки, что приводит к ослаблению энергетических связей между атомами, приближаясь к значению энергии разрушения заготовки  $E_{РАЗР}$ .

Величина суммарной энергии  $E_{НАП}$  есть значение, к которому добавляется энергетическое воздействие твердых метаемых частиц. Происходит превышение  $E_{РАЗР}$  кристаллической решетки заготовки и внедрение частиц в соответствии с эффектом СГП частиц (рис. 5).

При внедрении частиц в преграду энергия частиц  $E_ч$  представляет собой кинетическую инерционную энергию атомной массы вещества частицы  $E_{И}$  за вычетом реакции  $E_p$  на пограничный слой канала (аналог внутреннего трения):

$$E_ч = E_{И} - E_p.$$

Глубина проникания частицы зависит от ее общей атомарной массы. Торжование частицы и образование канала происходят, пока инерционный вектор кинетической энергии частицы не станет меньше энергии решетки заготовки. Т. е. в целом сверхбольшая глубина проникания обеспечивается энергией внедрения частицы на глубину  $H_{ВНЕД}$ . На участке  $H_{ЗАГ} - H_{ВНЕД}$ , где частицы не проникают, среда остается практически невозмущенной воздействием частицы (упругое столкновение) – это явление моментального затухания колебаний атомарной решетки (рис. 6).

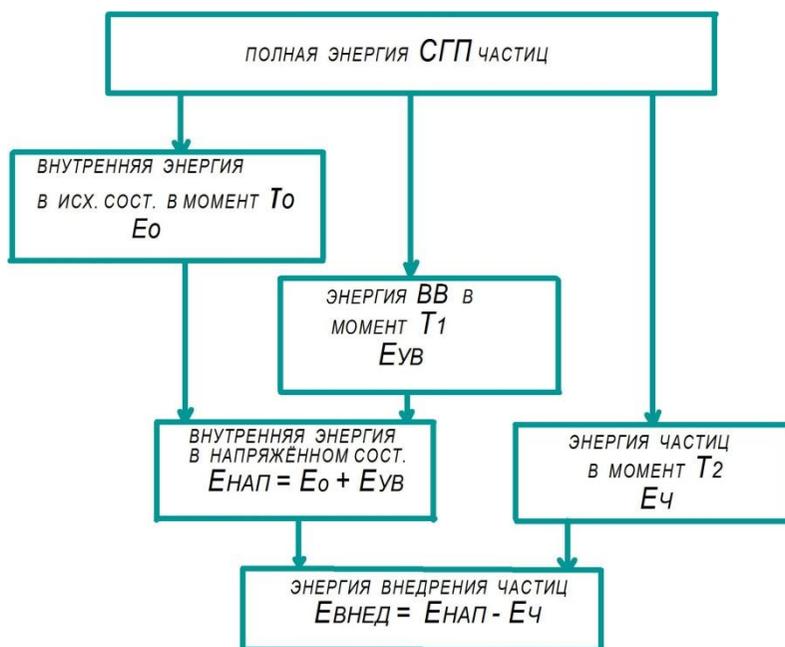


Рис. 5. Алгоритм энергетического баланса при СГП частиц

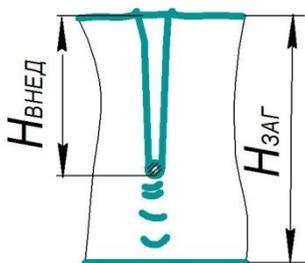


Рис. 6. Схема внедрения частиц в преграду

Кратко основной механизм СГП – это предварительное напряжение УВ продуктов детонации атомных связей кристаллической решетки преграды, приближая к уровню предельной прочности самой решетки, и при внедрении подошедших частиц имеем облегченный разрыв межмолекулярных и межатомных связей.

При этом для сверхглубокого проникания необходим разрыв только части межатомных связей на площади взаимодействия ударника с преградой  $\Delta$  по осевой канала, а по окружности канала материал деформируется и сминается (рис. 7).

Исследование состояния частиц в интервале скоростей 2–8 км/с (см. рис. 3) может дать возможное обоснование размерных границ микроударников при СГП частиц. Так, размеры проникающих частиц объясняются ударными процессами взаимодействия с преградой (табл. 3).

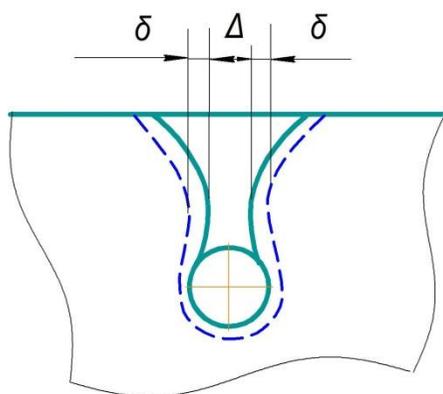


Рис. 7. Зоны деформации и разрушения кристаллической решетки преграды при СГП

Таблица 3

**Ударное взаимодействие частиц разных размеров**

Ориентировочный размер частицы	Области протекания явлений
До 1-10 мкм	Возможное плавление или испарение (сгорание) частицы при ударе о преграду.
~ 10 – 100 мкм	Сохранение целостности частицы. Имеет место пластическая деформация частицы. Возможен переход материала частицы в жидкое состояние.
Более ~100 мкм (или сотен мкм)	Дробление частицы. Возможно проникание отдельных фрагментов частицы с необходимой пробивной энергией и вектором.

Также оценка глубины разогрева частиц в ПД подтверждает обоснование размерного интервала частиц. Время взаимодействия ударника с преградой зависит от скорости метания. При скоростях протекания СГП время взаимодействия частицы с преградой находится в интервале  $10^{-6} - 10^{-8}$  с. Определим глубину прогрева материала метаемой частицы за время  $t$  [7] при импульсном энергетическом воздействии на материал  $x = \sqrt{at}$ , где  $a$  – теплопроводность (для стали  $a = 0,1 \text{ см}^2/\text{с}$ ). Размер частиц, которые могут прогреться до жидкого и возможно газообразного состояния, находится в интервале менее 10 мкм (наиболее вероятно – до 1 мкм). В этом случае СГП не может протекать.

Возможны резонансные явления при СГП частиц (рис. 8). При воздействии УВ в преграде возникает переменное поле давлений. Имеются периодические зоны сжатия и разрежения из-за упругих столкновений (пружинно-кинетического характера). При ударе фронтом подошедшей волны возникающие в заготовке остаточные резонансные колебания жесткой атомарной решетки имеют быстро затухающие свойства и способны фазово влиять на внедрение отдельных ударников, взаимно совпадая, накладываясь и усиливаясь или взаимослабясь. В сравнении с приведенными расчетными величинами сил возникшие величины резонансных напряжений незначительны и заносятся в зону погрешности влияний.

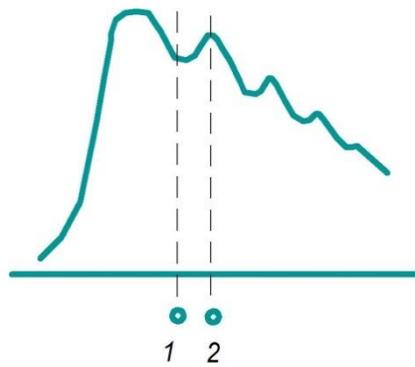


Рис. 8. Взаимодействие частиц 1 и 2 с волновым полем в преграде

Из проведенных выше исследований можно сделать вывод, что вероятнее всего скоростной интервал 1–3 км/с, который обеспечивает соответствующие давления соударения, может быть значительно повышен. Верхняя скоростная граница выявлена по взаимодействию порошков в основном технически чистых металлов, и затем перенесена на все порошковые материалы. Данные материалы не обладают высокой прочностью, поэтому при скоростях выше 3 км/с возможно их испарение или дробление до состояния невозможности проникать разрушенным фрагментам ввиду их малости, общей разноректорной кинетической энергии (в отличие от единого мощного вектора кинетической энергии целой частицы) и выброса в обратном метанию направлении.

Следовательно, по-видимому, метание высокопрочных частиц корунда, алмаза и т. п. материалов может проводиться с более высокими скоростями и энергиями. В результате получим максимально большие глубины проникания в заготовку металлов и сплавов.

Основные выводы по работе:

1. Проведен анализ влияния параметров соударения с определением роли удельной энергии высокоскоростных ударников.
2. Определен принцип, выявляющий возможность сверхглубокого проникания частиц как эффекта перехода поверхностного площадного разрушения в сверхглубокое туннельное проникание приблизительно того же объема.
3. Показана роль УВ продуктов детонации как фактор предварительного напряжения кристаллической решетки для последующего более свободного внедрения частиц.
4. Определена структура энергетического баланса при СГП.
5. Показано, что механизм сверхглубокого проникновения осуществляется за счет разрыва межмолекулярных и межатомных связей при внедрении частиц.
6. Обоснован размерный интервал проникающих частиц при СГП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушеренко С.М., Дыбов О.А., Коваль О.И. Рассмотрение результатов по сверхглубокому прониканию частиц в металлические преграды // Инж.-физ. журнал. – 2002. – Т. 75, № 2. – С. 191-195.
2. Андилевко С.А., Дыбов О.А., Роман О.В. Осесимметричный взрывной ускоритель с конической выемкой, заполненной порошком // Инж.-физ. журнал. – 2000. – Т. 73, № 4. – С. 797-801.
3. Aleksentseva S.E., Krivchenko A.L. Materials for the biomedicine, received by processing metals the high-speed stream of the discrete the particles, generated by the shock wave // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. – Kiev, Ukraine, 16-21 September, 2012. – p. 435-438.

4. Патент RU № 2 501 882 C2, МПК C22F 1/18, опубл. 20.12.2013. Способ получения наноструктурированного технически чистого титана для биомедицины. Алексенцева С.Е., Кривченко А.Л.
5. Алексенцева С.Е., Кривченко А.Л. Воздействие потока высокоскоростных дискретных частиц с различными характеристиками на металлы // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2(42). – С. 56-61.
6. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с.
7. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 239 с.

*Статья поступила в редакцию 25 сентября 2014 г.*

## **ABOUT THE ROLE OF ENERGY AND CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED IMPACT AND SUPERDEEP INTRODUCTION OF PARTICLES**

***S.E. Aleksentseva, I.V. Zaharov, A.L. Krivchenko***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

*This paper analyzes the influence of impact parameters on the process of super-deep penetration of particles. The parametrical principle which reveals the possibility of super-deep penetration of particles is defined. The role of a shock wave of the detonation products as the factor of preliminary strain of crystalline lattice for the subsequent penetration of particles is shown. The algorithm of energy balance for super-deep penetration is developed. The mechanism of super-deep penetration by rupture of intermolecular and interatomic bonds during the penetration of the particles is offered. The substantiation of a dimensional interval of penetrating particles for super-deep penetration is made.*

***Keywords:*** Shock waves, destruction of internuclear communications, model of superdeep introduction, stream of high-speed discrete particles.

---

*Svetlana E. Aleksentseva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Igor V. Zaharov, Leading Engineer.  
Alexander L. Krivchenko (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

УДК 621. 762

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПОРТНОГО ГРАНУЛЯТА CATAMOLD 42CRMO4 ДЛЯ МИМ-ТЕХНОЛОГИЙ

*А.Р. Самборук, Н.В. Дегтярёва, А.А. Антипова, Д.В. Костин*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Проведено исследование микроструктуры, рентгенофазового и химического состава импортного гранулята для МИМ-технологии Catamold 42CrMo4, что позволило дать рекомендации по подбору отечественных аналогов для полимерной и металлической части гранулята. Определены механические характеристики гранулята Catamold 42CrMo4 – плотность, показатель текучести расплава, насыпная плотность и насыпной вес. Проанализированы зарубежные патенты. Основным патентом для фидстоков фирмы BASF марки Catamold является европейский патент 1992 года EP 046590 по термопластичным композициям для изготовления металлических изделий. На основе данного патента рассмотрены основные критерии выбора связующего, примеры использования разных видов связок, их преимущества и недостатки. В итоге выявлены перспективные направления в области применения связующего для МИМ-процесса.*

**Ключевые слова:** *МИМ-технология, металлическая часть, полимерное связующее, гранулят, полимеры, полиформальдегид, текучесть расплава, плотность, насыпной вес, дифференциально-термический анализ, CATAMOLD.*

Metal Ingection Molding (МИМ) – перспективная технология производства малогабаритных деталей сложной формы как результат объединения метода литья полимерных материалов под давлением с технологиями порошковой металлургии [1].

Преимущества МИМ-технологии:

1. Возможность изготовления изделий сложной формы в массово-серийном производстве.

МИМ-процесс снимает практически все ограничения по сложности формы изготавливаемой детали. Все, что было принципиально невозможно реализовать из-за ограничений механической обработки, теперь доступно.

2. Точность допусков и размеров, не требуется дополнительная механическая обработка.

В настоящее время МИМ-технология позволяет получать детали с минимальной толщиной сечения от 0,4 до 30 мм с допусками в пределах 0,1 мм на каждые 25 мм линейных размеров детали.

3. Возможность получения практически любой поверхности.

МИМ-процесс позволяет придавать поверхностям формируемых деталей

---

*Анатолий Романович Самборук (д.т.н., проф.), преподаватель кафедры «Материаловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».*

*Наталья Валерьевна Дегтярёва, аспирант.*

*Антонина Александровна Антипова, аспирант.*

*Дмитрий Владимирович Костин, студент.*

практически любые свойства – от очень гладких до текстурированных.

4. Увеличение прочности деталей за счет варьирования рецептур гранулятов.

В рецептуру гранулята вводятся упрочняющие добавки в виде порошка карбида титана или порошка карбидосталей.

5. Экономия исходных материалов и снижение себестоимости изделий. Сокращение затрат на дорогостоящие фрезы, станки и их обслуживание.

Негативные последствия отсутствия МИМ-технологий в приборостроительном производстве усугубляются тем, что альтернативных технологических решений, имеющих подобные высокие технико-экономические показатели (коэффициент использования материала до 0,95, возможность полной автоматизации производства даже в условиях небольших серий, малостадийность технологии и др.), нет.

К сожалению, возможности отечественных предприятий в применении высокоэффективного процесса инъекционного прессования деталей из мелкодисперсных порошков металла или керамики ограничены отсутствием в России сырьевой базы.

Сырьем для изготовления деталей методом МИМ-технологии являются мелкодисперсные металлические порошки железа и легирующих элементов фракцией от 1 до 20 мкм, смешанные с термопластичным связующим (пластификатором) и специальными смазками. Такая композиция называется гранулятом, или фидстоком.

Немногочисленные частные компании, изготавливающие в России детали по данной технологии, работают на дорогостоящем импортном грануляте (фидстоке) в основном производства фирмы BASF, Германия. Поэтому первоочередной задачей для развития МИМ-технологии в России является разработка отечественного гранулята.

В качестве начального этапа решения поставленной задачи были проведены исследования импортного гранулята Catamold 42CrMo4.

Плотность гранулята Catamold 42CrMo4 определяли после испытания на пластомере при температуре 190 °С. Образцы цилиндрические диаметром 2 мм, длиной от 13,2 до 13,4 мм взвешивали на электронных весах с точностью  $\pm 0,0001$  г и измеряли размеры микрометром с точностью  $\pm 0,01$  мм (табл. 1).

Таблица 1

**Геометрические размеры гранулята Catamold 42CrMo4**

№ опыта	Масса образца М, г	Диаметр образца D, см	Длина образца Н, см	Плотность образца, г/см <sup>3</sup>
1	0,1894	0,20	1,32	4,57
2	0,1902	0,20	1,33	4,57
3	0,1927	0,20	1,34	4,57

Таким образом, средняя плотность гранулята Catamold 42CrMo4 составляет около 4,57 г/см<sup>3</sup>.

Измерение насыпного веса гранулята осуществлялось заполнением заданного объема 50 мл навеской гранулята с дальнейшим взвешиванием навески (табл. 2).

Насыпной вес гранулята Catamold 42CrMo4

№ опыта	Заданный объем V, мл	Насыпной вес гранулята, г/см <sup>3</sup>
1	50,0	1,32
2	50,0	1,32
3	50,0	1,34

Таким образом, средний насыпной вес гранулята Catamold 42CrMo4 составляет около 1,33 г/см<sup>3</sup>.

Определение текучести гранулята Catamold 42CrMo4 проводилось на экструзионном гравиметрическом пластометре TWEI Vindex (США). При испытаниях на определение текучести расплава измеряют течение расплавленного полимера через выдавливающий пластометр при заданных условиях температуры и нагрузки. Выдавливающий пластометр состоит из вертикального цилиндра с небольшой головкой диаметром 2,095 мм в нижней части и съемного поршня в верхней части. Порцию материала помещают в цилиндр и предварительно нагревают в течение нескольких минут. Поршень устанавливают на верхнюю поверхность расплавленного полимера, и его вес продавливает полимер через головку на сборную плиту. Количество полимера, собранного после заданного периода испытаний, взвешивают и пересчитывают в количество граммов, которое могло быть выдавлено через 10 мин. Скорость течения расплава выражают в граммах на эталонное время [2].

Среднее значение текучести по результатам 10 опытов при температуре 190 °С и грузе 21,6 кг составило 511 г/10 мин, что несущественно превышает заявленное значение в сертификате на фидсток Catamold 42CrMo4 германской фирмы BASF (200–500 г/10 мин).

Исследование гранулометрического состава и морфологии частиц металлической части гранулята производилось на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A.

На рис. 1 представлена фотография гранулята Catamold 42CrMo4.

В состав гранулята входит тонкий микропорошок сферической формы с размером частиц от 1 до 5 мкм.

Для определения содержания металлической части гранулята был использован метод термического разложения органической части на установке для дифференциально-термического (ДТА) и термогравиметрического анализа (ТГА) «Термоскан-2».

Навеска гранулята в количестве 1000 мг помещалась в тигель и нагревалась до температуры 600 °С со скоростью 20 °/мин. При этом полимерная часть выгорала, а остаток соответствовал содержанию металлической части в грануляте.

Для гранулята Catamold 42CrMo4 содержание металлической части составило 88–89 % и соответственно полимерной части – 11–12 %.

Исследование химического и элементного состава частиц металлической части гранулята проводилось на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A с микрорентгеноспектральным анализатором JED.

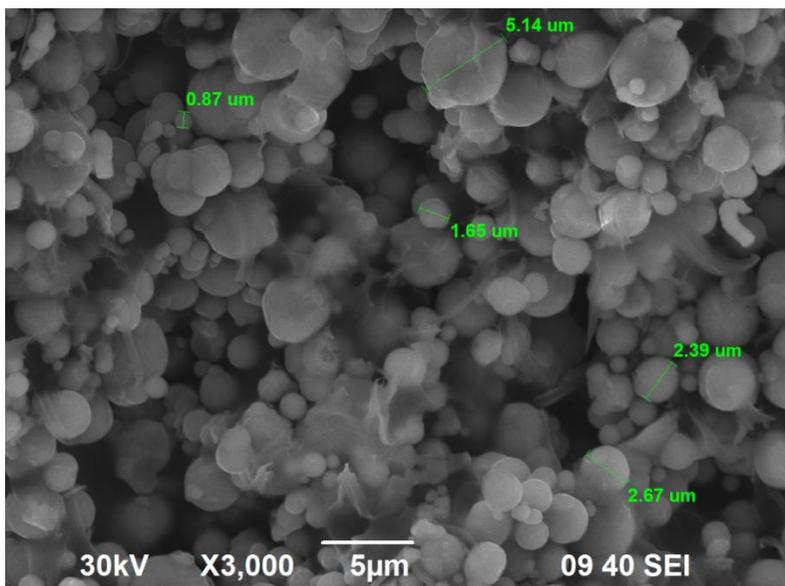


Рис. 1. Фотография гранулята Catamold 42CrMo4 при увеличении X3000

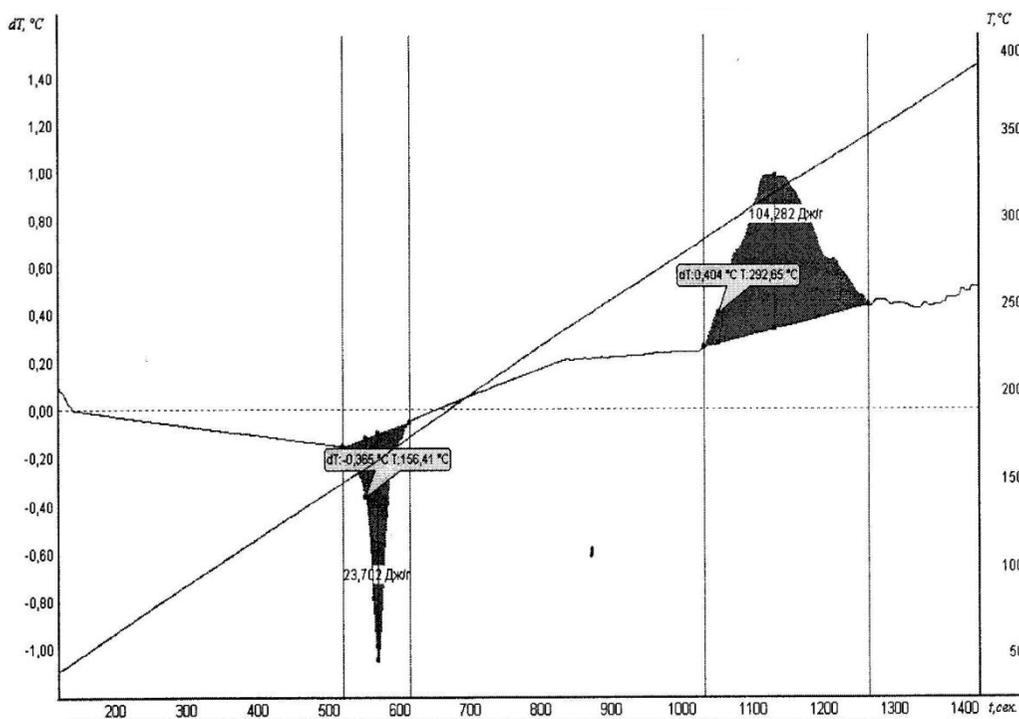


Рис. 2. Термограмма разложения гранулята Catamold 42CrMo4

В результате было установлено, что металлическая часть гранулята Catamold 42CrMo4 состоит из порошка сплава железа (97–98 %), хрома (0,2–0,4 %) и молибдена (0,2–0,3) %.

Исследование полимерной части гранулята Catamold 42CrMo4 проводилось на дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСК-500.

На рис. 2 изображена термограмма разложения гранулята.

При разложении гранулята Catamold 42CrMo4 на дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСК-500 наблюдается два пика: эндотермический и экзотермический.

Эндотермический пик – с удельным тепловым эффектом 23,7 Дж/г и температурой 156 °С – соответствует плавлению полимера. Подтверждается это обратимостью эффекта при нагревании образца до 290 °С и размягчением нагретого образца.

Экзотермический пик – с удельным тепловым эффектом 104,3 Дж/г и температурой 293 °С – соответствует процессу термического разложения полимерной компоненты образца. Данный факт подтверждается потерей массы образца, а также тем, что при последующем нагреве какие-либо термические эффекты в диапазоне температур до 500 °С отсутствуют.

После термического разложения образца остается сухой остаток серого цвета, форма образца сохраняется.

Состав полимерной части Catamold 42CrMo4 исследовался с помощью ИК-Фурье спектроскопии. Были выявлены линии, характерные для полиформальдегида ( $\text{см}^{-1}$ ) 1087,71, 1234,28, а также линии с волновым числом ( $\text{см}^{-1}$ ) 2915,99, 2848,49, 1463,78, 729, характерные для полиэтиленов. Поэтому полимерную фазу составляют полиформальдегид (значительная часть) и полиэтилен (по всей вероятности ПЭВД) [3].

### **Заключение**

Проведенное исследование импортного гранулята Catamold 42CrMo4 позволило сделать рекомендации по подбору отечественных аналогов:

- для полимерной части отечественным аналогом является полиформальдегид с процессинговыми добавками Технасет А-110;
- для металлической части отечественным аналогом металлической части Catamold 42CrMo4 являются карбонильное железо и порошки конструкционных легированных сталей марок 40ХФА и 38ХМ.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *German R.M., Bose A.* Injection molding of metals and ceramics – Princeton, New Jersey, USA, 1997. – 414 p.
2. *Пархоменко А.В., Самборук А.Р., Игнатов С.В., Костин Д.В., Шульტიмова А.С.* Развитие связующих веществ в гранулятах для МИМ-технологии // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – № 2 (38). – 2013. – С. 91.
3. *EP Patent 0465940.* Thermoplastic masses for preparing metallic moldings. 1992.

*Статья поступила в редакцию 24 апреля 2014 г.*

## STUDY OF IMPORT GRANULATE CATAMOLD 42CRMO4 MIM FOR TECHNOLOGY

*A.R. Samboruk, N.V. Degtyareva, A.A. Antipova, D.V. Kostin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*This paper deals with study of microstructure, X-ray diffraction and chemical composition of import granulate for MIM technology – Catamold 42CrMo4; this study allowed to give recommendations on the selection of the domestic analogues for the polymer and metal parts of the granulate. Mechanical characteristics of the Catamold 42CrMo4 granulate, such as density, melt flow rate, bulk density and bulk weight are determined. Foreign patents are analyzed. The basic patent for the feedstocks of BASF Catamold is European patent EP 046590 issued in 1992 for thermoplastic compositions for the manufacture of metal products. On the basis of this patent, main criteria for the selection of the binder are considered, as well as examples of use of different types of chords, their advantages and disadvantages. As a result, promising directions in the area of the application of the binder for MIM process are determined.*

**Keywords:** *MIM technology, metal part, a polymeric binder, granules, polymers, Acetal, melt flow rate, density, bulk density, thermal analysis defferentsialno, CATAMOLD.*

---

*Anatoly R. Samboruk (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Nataliya V. Degtyareva, Postgraduate student.  
Antonina A. Antipova, Postgraduate student.  
Dmitry V. Kostin, Postgraduate student.*