

## ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА НА ПРОЦЕСС СТРУЕОБРАЗОВАНИЯ

*Е.М. Гриф, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский*

*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия*

На основании обзора научно-технической литературы проводится анализ влияния микроструктуры материала кумулятивной облицовки на пробивную способность кумулятивных зарядов: в зависимости от среднего диаметра, прочности границ, однородности формы, размера и ориентации зерен металла. Выдвигается и обосновывается модель идеальной структуры металла кумулятивной облицовки. Проводится оценка современного уровня развития технологий производства кумулятивных облицовок, рассматриваются перспективные технологии, оценивается возможность создания кумулятивных облицовок с требуемой микроструктурой. Исходя из допущения о неделимости и целостности зерна металла, основанного на постулатах мезомеханического явления зернограничного скольжения, выдвигается идея о возможности проведения численных экспериментов по формированию кумулятивных струй с разным задаваемым шагом расчетной сетки. Проводится численный расчет функционирования кумулятивных зарядов конической и сложной коническо-кольцевой формы облицовки для стороны ячейки-зерна в 500, 250 и 125 мкм. Визуально оценивается эффективность процесса струеобразования в зависимости от величины зерна по выделяемым параметрам: направлениям векторов скоростей ячеек-зерен материала и вводимому параметру  $\gamma$  – угол между приведенным вектором скорости головной части струи и осью симметрии струеобразования. Полученные результаты коррелируют с существующими знаниями о физике процесса кумуляции: при уменьшении размера стороны ячейки-зерна направленность течения металла увеличивается, форма головной части струи «вытягивается». То есть предлагаемый способ численных исследований проблемы взаимосвязи микроструктуры кумулятивной облицовки и пробивающей способности кумулятивного заряда открывает широкие возможности в дальнейших исследованиях, в том числе при моделировании кумулятивных облицовок с более мелким зерном и при различных модификациях математической постановки задачи.

*Ключевые слова:* кумуляция, размер зерна, кумулятивная струя, кумулятивная облицовка.

### Введение

К настоящему времени кумулятивные заряды находят широкое распространение как в военной, так и в гражданской промышленности. Применение кумулятивного эффекта открывает широкие возможности для повышения эффективности скважинной перфорации при нефте- и газодобыче, проведения резки габаритных конструкций в труднодоступных или опасных для человека условиях, осуществления разделительных операций в условиях ограниченности источников энергии и т. д.

Пробивное действие – одна из основных значимых характеристик кумулятивных зарядов. Мировое научно-техническое сообщество активно ведет исследования, направленные на повышение глубины пробития кумулятивными зарядами: за счет оптимизации размеров и формы кумулятивного заряда, формы, геометрии и материала кумулятивной облицовки, качества, энергосодержания, плотности и скорости детонации взрывчатого вещества, наличия линзового узла, правильного подбора фокусного расстояния для заряда и точности изготовления деталей заряда и их сборки [1].

Металлы имеют кристаллическое строение – состоят из множества кристаллов неправильной формы, называемых кристаллитами (зернами). Для реальных поликристаллических металлов принято связывать средний размер зерна и величину предела текучести соотношением Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение, характеризующее сопротивление пластической деформации со стороны кристаллической решетки и дефектов решетки, препятствующих движению решеточных дислокаций;  $k$  – коэффициент, характеризующий вклад в упрочнение со стороны границы зерен,  $d$  – средний размер зерен.

Выделяют три основных критических размера зерна, в окрестности которых происходят значительные изменения свойств поликристаллического металла. При измельчении зерна диаметром менее 10 нм происходит смена знака коэффициента Холла–Петча – зернограницное упрочнение сменяется зернограницным разупрочнением; 100 нм [2] – перемещение дислокаций на границы зерна, т. е. образование бездислокационных зерен. При среднем диаметре кристаллитов более 1000 нм количество статически запасенных дислокаций больше геометрически необходимых дислокаций [3]. Приведенные закономерности объясняют природу отличий механического поведения мелкозернистых сплавов от поведения аналогичных крупнокристаллических сплавов.

Также важным аспектом в оценке микроструктуры металла является прочность границ зерен. На границах зерен – двумерных специфических областях, отделяющих различные однородные части кристалла – существует переходный слой, в котором закономерность расположения атомов резко нарушается. Пограничные слои зерен отличаются от внутренних слоев физико-химическими свойствами. Отсутствие правильности строения металла в пограничных межзеренных слоях приводит к тому, что атомы в этих слоях не находятся в положениях, соответствующих минимуму потенциальной энергии. Отсюда следует, что их подвижность может быть больше, чем во внутренних слоях зерен, а их относительное перемещение может потребовать несколько меньших касательных напряжений. Следовательно, процесс струеобразования и формирования кумулятивной струи происходит в случае достаточно прочных границ зерен, когда межкристаллитные перемещения незначительны и не вызывают дополнительных затрат энергии при струеобразовании.

Если рассматривать кумулятивную струю как инструмент пробития, то различную микроструктуру самого материала оболочки можно рассматривать как типы конструкций, которые задают параметры и размеры кумулятивной струи. Тогда для достижения наибольшей глубины пробития кумулятивной струей к микроструктуре материала предъявляются следующие требования: средний диаметр зерен металла не превышает 10 нм; зерна однородны по форме, размеру и ориентации; границы зерен прочны.

Однако, выдвигая подобные требования, важно оценивать современный уровень развития технологий, их возможности и перспективы. Рассмотрим некоторые известные из них.

Самый распространенный способ изготовления кумулятивных облицовок – ротационная вытяжка и ее производные. Традиционная ротационная вытяжка относительно экономична, однако готовые изделия отличаются неоднородностью деформаций в материале, что приводит к рассеянию энергии при струеобразовании. Во избежание описанного эффекта возможно применение способа изготовления кумулятивных облицовок, в основе которого лежит поэтапное двунаправленное деформирование заготовки, чередующееся с рекристаллизационным отжигом. Применение подобной технологии позволяет получать заготовки с пластическими свойствами, аналогичными тем, что были до обработки, и обеспечивает отсутствие сдвиговых искажений в материале, так как поэтапная двунаправленная вытяжка обеспечивает их полную взаимную компенсацию. Данный способ обеспечивает получение микрокристаллической структуры с мелким и однородным зерном, и его использование позволяет в зависимости от определенных условиями применения расстояния до преграды повысить на 15–30 % пробивное действие кумулятивных зарядов [4].

Взрывные технологии являются одними из передовых в современной металлообработке. Существует способ их применения, позволяющий увеличить пробивающую способность кумулятивных зарядов. При изготовлении кумулятивных облицовок на их внутреннюю часть наносится слой высокоплотного порошкового материала – вольфрама и плотнее – с помощью детонационной пушки, тем самым проводится операция микросварки метаемых частиц с материалом подложки, т. е. формируется струеобразующий слой металла с новыми характеристиками. В результате испытаний по пробитию пакета стальных пластин перфорационными кумулятивными зарядами ЗПКС-80, оснащенными модифицированными кумулятивными облицовками, изготовленными по

предложенной технологии (толщина напыления 0,1–0,5 мм), исследователи отметили увеличение глубины пробития на 15 % по сравнению со штатными образцами [5].

Одной из новейших является идея об использовании кумулятивной облицовки с анизотропными механическими свойствами. Предлагается вариант исполнения кумулятивной облицовки, в которой все кристаллы ориентированы в направлении течения материала. Подобным способом достигается максимальная пластичность материала, от которой, собственно, и зависит длина кумулятивной струи и соответственно – глубина пробитого отверстия. Заготовка оболочечной детали кумулятивной облицовки изготавливается методом направленного намораживания металла на кристаллизатор, причем для того чтобы можно было использовать в качестве материала кумулятивной облицовки низкосортную медь предварительно на кристаллизатор-пуассон методом гальванического осаждения наращивают слой чистой электролитической меди толщиной 200–300 мкм, необходимой для струеобразования. Технология позволяет получить кумулятивные облицовки с плотной радиально направленной столбчатой структурой, при этом величина пробития по результатам экспериментов увеличилась на 23–29 % по сравнению с облицовками, изготовленными точением [6].

В силу физико-механических свойств материала, вследствие обработки в заготовке проявляется технологическая наследственность в виде неоднородности деформаций, напряжений в металле, измененной кристаллографической структуры, которые в конечном счете и определяют макрохарактеристики готового изделия [7]. Неоднородность напряжений и микроструктура металла тесно связаны. Например, для металлов, полученных методами интенсивного пластического деформирования, характерна нестабильность микроструктуры при нагреве, в том числе при отжиге, направленном на снятие внутренних напряжений в заготовке.

В последние годы достигнуты большие успехи в получении и исследовании нового класса металлических материалов – материалов с нано- и микрокристаллической структурой, имеющих уникальные свойства: повышенная прочность, хладноломкость, устойчивость к радиации и др., – и применяемых во многих областях науки и техники [8]. Подобные материалы получают методами интенсивного пластического деформирования [9, 10]. Например, технология равноканального углового прессования позволяет контролировать величину зерна при обработке, что, в свою очередь, открывает широкие возможности для проведения экспериментальных исследований. Например, в существующих экспериментальных исследованиях изменения глубины пробития кумулятивных зарядов в зависимости от среднего размера зерна и неоднородности материала кумулятивных облицовок отмечается, что уменьшение величины зерна с балла № 6 до № 14 приводит к увеличению стабильности действия кумулятивных зарядов в 2,3 раза, а с появлением неоднородности (увеличением количества баллов зерен в металле с одного до четырех) эффективность действия кумулятивных зарядов при среднем балле зерна № 6 (0,044 мм) уменьшается на 28 % [11].

Описанные выше технологии имеют собственные достоинства и недостатки, однако наиболее подходящей под заданные требования, отработанной и позволяющей получать наиболее стабильный результат является технология равноканального углового прессования.

Повышение эффективности функционирования кумулятивных облицовок с мелким зерном можно интерпретировать и по-другому. Предположим, что при измельчении зерна до таких размеров форма кристаллитов не имеет большого влияния на протекание высокоскоростных пластических процессов. То есть при измельчении зерна до размера 10 нм и мельче межкристаллические взаимодействия настолько малы, что можно предположить, что материал в данном случае ведет себя как монолит: движение кристаллов не хаотическое, обусловленное разноориентированностью, разной формой зерен, а упорядоченное, приводящее к наименьшей потере энергии процесса на пластическую деформацию и, следовательно, увеличивающее длину струи – величину пробития преграды.

### 1. Расчетная схема, принятые допущения

Исследования связи микроструктуры и поведения металла кумулятивных облицовок обычно проводятся экспериментально, и лишь их результаты обрабатываются с помощью программно-вычислительных комплексов, так как строгое и полное описание поведения реальных металлов при деформировании вызывает определенные трудности. Для численных исследований поведения металла кумулятивных облицовок на микроуровне воспользуемся допущением. В физике

пластичности и прочности металлов хорошо известно явление зернограничного скольжения – смещение одного кристаллита относительно другого вдоль общей границы [12]. Физическая мезомеханика [13] рассматривает зернограничное скольжение и внутризеренную дислокационную деформацию на различных структурно-масштабных уровнях. Границы зерен в поликристаллах классифицируются не как дефект микромасштабного уровня [14], а как самостоятельная 2D подсистема мезомасштабного уровня, причем при развороте зерна рассматриваются как целое [15]. Воспользовавшись подобным допущением, в среде моделирования высокоскоростных нелинейных динамических процессов Ansys Autodyn [16] можно провести численный эксперимент функционирования осесимметричных кумулятивных зарядов с облицовками конического (рис. 1, а) и сложного коническо-кольцевого (рис. 1, б) типов для трех вариантов назначенных шагов расчетных сеток – трех размеров ячеек-зерен – для выявления предполагаемой связи между средним размером зерна металла и упорядоченностью его пластического течения – кинематикой процесса струеобразования.

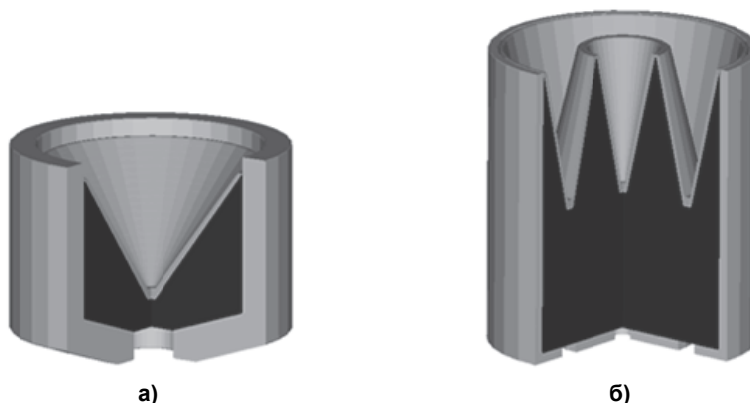


Рис. 1. Осесимметричный кумулятивный заряд с кумулятивной облицовкой: а – конического типа, б – сложного коническо-кольцевого типа

**2. Расчетные зависимости (модели).** Ставим задачу в двумерном пространстве, симметрия – аксиальная, границы, за исключением оси, – открытые (Flow out) [17–19]. Для решения основных уравнений применяется метод Эйлера. Размер ячеек сетки выбираем в  $125 \times 125$ ,  $250 \times 250$  и  $500 \times 500$  мкм соответственно, исходя из выделенной задачи исследования и соотношения разумной точности расчета и вычислительных затрат.

Уравнение состояния JWL (Джона–Уилкинса–Ли) используется для описания поведения взрывчатого вещества как:

$$P_E = A_1 \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}, \quad (2)$$

где  $P_E$  – давление;  $V = 1/\rho_B$  – удельный объем;  $\rho_B$  – плотность взрывчатого вещества;  $E_0$  – удельная внутренняя энергия на единицу массы;  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $\omega$  – константы.

Уравнения кумулятивной облицовки основываются на ударной модели (Shock). Упрочнение в данном случае игнорируется, так как согласно физике процесса облицовка ведет себя как жидкость под большими давлениями и температурами во время деформации.

Существует эмпирическая линейная зависимость между скоростью детонации  $U_S$  и массовой скоростью частиц  $u_p$ , выполняющаяся для большинства твердых веществ и жидкостей в широком диапазоне. В коде Autodyn это соотношение определяется как

$$U_S = C_0 + S u_p, \quad (3)$$

где  $S$  – константа, отражающая наклон зависимости  $U_S(u_p)$ , а  $C_0$  – скорость звука в веществе.

Тогда удобно представить в форме Ми–Грюнайзена уравнение, основанное на ударной зависимости Гюгонио:

$$P = P_H + \Gamma \rho (E - E_H), \quad (4)$$

## Численные методы моделирования

где  $\Gamma\rho = \Gamma_0\rho_0 = \text{const}$ ,  $\Gamma = B_0 / (1 - \mu)$  – коэффициент Грюнайзена,  $B_0$  – константа,  $\mu = \rho / \rho_0$  – сжимаемость;  $\rho_0$  – эталонная плотность;  $P_H$  – давление Гюгонио.

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (S - 1)\mu]^2} \quad (5)$$

и  $E_H$  – энергия Гюгонио

$$E_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{\rho_0} \left( \frac{\mu}{\mu + 1} \right). \quad (6)$$

Уравнения состояния стальной оболочки также подчиняется ударной модели Shock. Модель прочности стальной оболочки описывается уравнением Джонсона–Кука, которое определяет предел текучести  $Y$  как:

$$Y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \log \varepsilon_p^*)(1 - T_H^m), \quad (7)$$

где  $\varepsilon_p$  – эффективная скорость пластической деформации,  $\varepsilon_p^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$  и  $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$  – нормализованная эффективная скорость пластической деформации,  $T_H^m = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$  – гомологичная температура,  $T_{melt}$  – температура плавления,  $T_{room}$  – комнатная температура,  $A, B, C, n$  и  $m$  – постоянные [20].

### 3. Результаты расчетов

Для визуальной оценки эффективности струеобразования введем понятие об упорядоченности процесса. Процесс может считаться упорядоченным, если направленность движения большей части ячеек-зерен, формирующих струю в данный момент, соответствует направлению, параллельному главной оси симметрии заряда. Тогда выделим визуально оцениваемые параметры: направленность движения материала – направление векторов скоростей ячеек, параметр  $\gamma$  – угол между приведенным вектором скорости головной части струи и осью симметрии струеобразования – главной осью кумулятивного заряда. Схема оценки представлена на рис. 2.

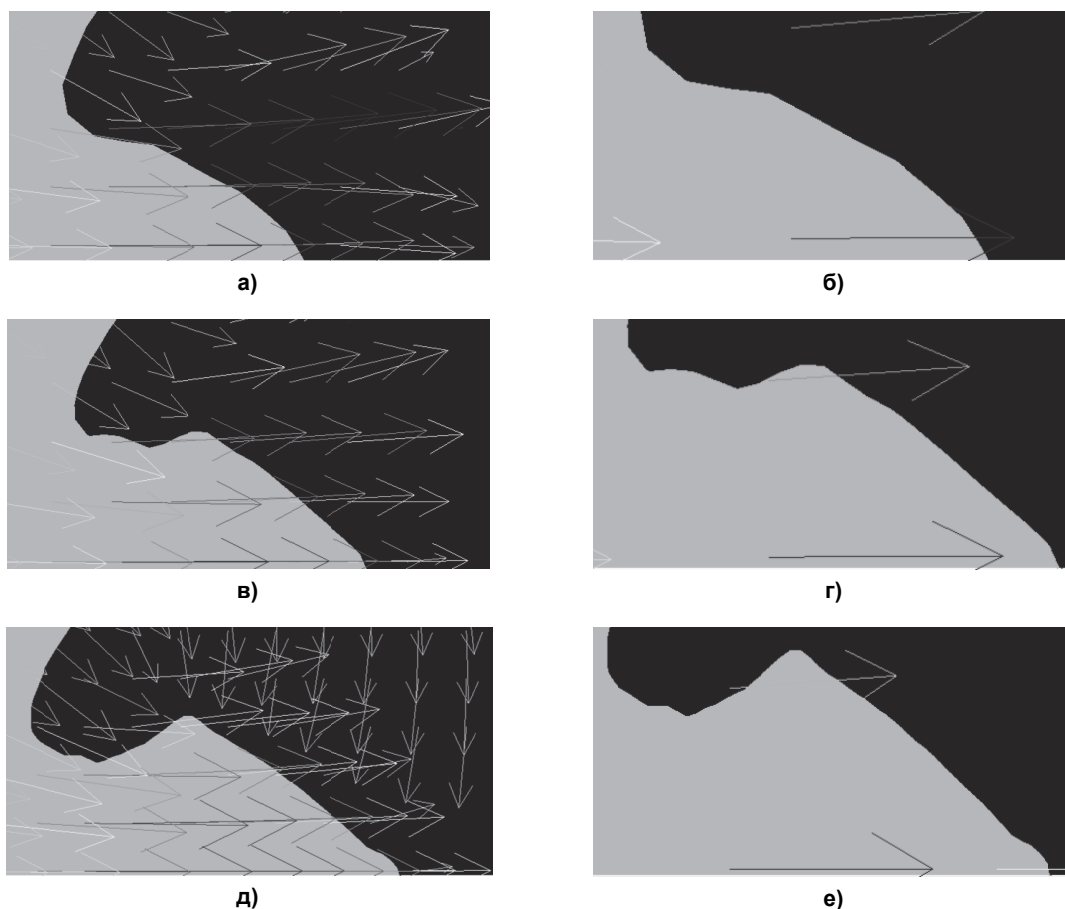


Рис. 2. Схема оценки упорядоченности процесса струеобразования

Результат расчета функционирования осесимметричного кумулятивного заряда с конической кумулятивной облицовкой в калибре 50 мм для расчетной ячейки-зерна стороной 500, 250 и 125 мкм в момент времени  $t = 9$  мкс показан на рис. 3.

Для предлагаемой конструкции момент времени начала струеобразования соответствует  $t = 9$  мкс. Направление векторов ячеек-зерен меди в идеале должно совпадать с направлением оси симметрии. На рис. 3, а наглядно показано, что не все вектора скоростей параллельны оси, т. е. процесс струеобразования проходит не упорядоченно, с потерями энергии на хаотичное движение зерен металла. Угол между приведенным вектором скорости, отображенным на рис. 3, б, и осью заряда составил  $\gamma = 0,8^\circ$ . В отличие от результатов предыдущего расчета, вектора скоростей ячеек-зерен меди на рис. 3, в практически параллельны оси симметрии струеобразования. Имеются локальные области отклонения направления векторов от главной оси, однако эти отклонения минимальны. Угол между приведенным вектором скорости, отображенным на рис. 3, г, и осью заряда составил  $\gamma = 0,2^\circ$ . Расчетная картина, приведенная на рис. 3, д, в сравнении с расчетными картинками, представленными на рис. 3, а (500 мкм) и рис. 3, в (250 мкм), указывает на наибольшую устойчивость процесса: локализации отклонений векторов скоростей ячеек-зерен минимальны и в целом визуально направлены в направлении течения материала. То есть при уменьшении размера ячейки расчетной сетки – зерна металла – движение потока металла дейст-

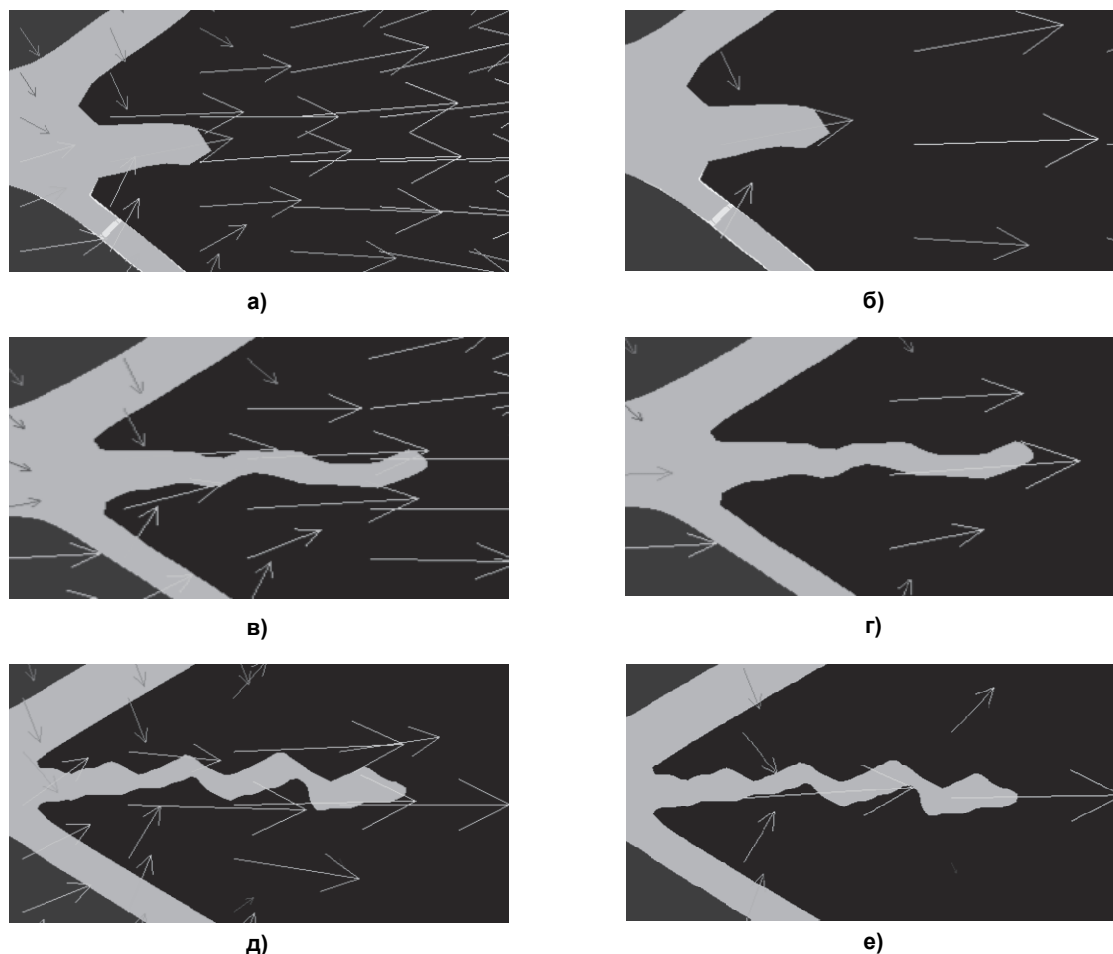
вительно упорядочивается, из чего следует, что энергия, сообщаемая кумулятивной облицовке продуктами детонации, расходуется наиболее эффективно – без потерь на хаотическое движение кристаллитов. Приведенный вектор скорости, отображенный на рис. 3, е, и ось заряда параллельны ( $\gamma = 0^\circ$ ).



**Рис. 3.** Расчет начального этапа струеобразования для осесимметричного кумулятивного заряда с кумулятивной облицовкой конического типа: а, б – увеличенные фрагменты для расчетной ячейки стороной 500 мкм; в, г – увеличенные фрагменты для расчетной ячейки стороной 250 мкм; д, е – увеличенные фрагменты для расчетной ячейки стороной 125 мкм

Также стоит обратить внимание на форму головной части струи. Если на рис. 3, а головная часть формирующейся струи «сплюснутая», то на расчетных картинах 3, в и 3, д головная часть удлиненная, тонкая, что соответствует существующему представлению о связи размера зерна металла кумулятивной облицовки и эффективности процесса струеобразования: по известным экспериментальным данным доподлинно известно, что при измельчении зерна увеличивается длина кумулятивной струи и, соответственно, глубины пробития преграды.

Показателен для рассмотрения случай неустойчивого струеобразования. Примером неустойчивого струеобразования является функционирование кумулятивного заряда сложной коническо-кольцевой формы облицовки, представленного на рис. 4, б. Конструкция подобного заряда представляет собой цилиндрический корпус с расположенной в нем шашкой взрывчатого вещества с кумулятивной выемкой. К кумулятивной выемке прилегает кумулятивная облицовка сложной формы, которую условно, для удобства при оценке результатов исследований, можно разделить на два элемента: внутренний – конический и внешний – кольцевой. При инициировании взрывчатого вещества и распространении детонации в нем элементы кумулятивной облицовки, обжимаясь, формируют традиционную цилиндрическую и, соответственно – кольцевую кумулятивную струи. Фрагмент расчетной картины функционирования кумулятивного заряда с размерами ячейки-зерна 500, 250 и 125 мкм для момента времени  $t = 10$  мкс, отображающий кинематику струеобразования кольцевого кумулятивного элемента, представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Расчет начального этапа струеобразования для осесимметричного кумулятивного заряда с кумулятивной облицовкой сложного коническо-кольцевого: а, б – увеличенные фрагменты для расчетной ячейки стороной 500 мкм; в, г – увеличенные фрагменты для расчетной ячейки стороной 250 мкм; д, е – увеличенные фрагменты для расчетной ячейки стороной 125 мкм

Формирующаяся кольцевая кумулятивная струя несимметрична: из-за того, что в конструкции заряда не применяются специальные приемы, приспособления [21], в т. ч. линзовый узел, кольцевой элемент облицовки обжимается неравномерно. Направление движения металла – ось струеобразования – не параллельно оси симметрии заряда и оси симметрии элемента кумулятивной облицовки, т. е. происходят большие потери энергии на пластическую деформацию металла кумулятивной облицовки в направлениях перпендикулярных или находящихся под углом к оси симметрии облицовки, что негативно сказывается на эффективности протекания процесса струеобразования. По результатам расчета, отображенным на рис. 4, б, угол между приведенным вектором скорости и осью заряда составил  $\gamma = 12^\circ$ . При уменьшении размера ячеек-зерен расчетная картина меняется. На рис. 4, г наблюдается большая упорядоченность движения металла: угол между приведенным вектором скорости и осью заряда составил  $\gamma = 5^\circ$ . Также стоит отметить, что длина сформированного на показанный момент времени кумулятивного элемента увеличилась: происходят меньшие потери энергии, нежели при функционировании кумулятивного заряда с более крупным зерном металла облицовки. Дальнейшее уменьшение размера ячейки-зерна также влияет на получаемые результаты: на рис. 4, д четко просматриваются «пульсации» образовавшегося фрагмента кумулятивной струи; однако стоит отметить и направленность векторов ячеек-зерен, параллельную главной оси симметрии кумулятивного заряда – угол между приведенным вектором скорости, изображенным на рис. 4, е, и осью заряда составил  $\gamma = 1^\circ$ , – и увеличившуюся в сравнении с рис. 4, а длину сформированного кумулятивного элемента, что говорит о наиболее эффективном распределении энергии в процессе струеобразования.

### Выводы

1. На основании анализа научно-технической литературы сделан вывод, что наибольшей пробивающей способностью обладают кумулятивные заряды, кумулятивной облицовки которых имеют однородную мелкозернистую (до 10 нм) микроструктуру, зерна при этом не должны значительно отличаться по форме и направленности.

2. Проведено численное моделирование функционирования кумулятивных зарядов конической и сложной коническо-кольцевой формы облицовки для трех вариантов шагов расчетных сеток, моделирующих размер зерна 500, 250 и 125 мкм соответственно.

3. Для оценки результатов численного моделирования процесса струеобразования введено понятие упорядоченности процесса – направленности движения зерен-ячеек, формирующих струю, соответствующей направлению, параллельному главной оси заряда. Для определения направленности введены следующие параметры: направление векторов скоростей ячеек, параметр рассеивания  $\gamma$  – угол между приведенным вектором скорости головной части струи и осью симметрии струеобразования – главной осью симметрии кумулятивного заряда.

4. Численное моделирование функционирования осесимметричного кумулятивного заряда с облицовками конического и коническо-кольцевого типов подтвердило предположение об увеличении упорядоченности процесса струеобразования с измельчением размера ячейки: для конической облицовки при уменьшении шага расчетной сетки с 500 до 125 мкм параметр рассеивания изменился с  $\gamma = 0,8^\circ$  до  $\gamma = 0^\circ$ , для сложной коническо-кольцевой облицовки, для кольцевой струи – с  $\gamma = 12^\circ$  до  $\gamma = 1^\circ$ .

### Обсуждение и применение

Полученные результаты коррелируют с существующими знаниями о физике процесса кумуляции: при уменьшении размера стороны ячейки-зерна направленность течения металла увеличивается, форма головной части струи «вытягивается». Предлагаемый способ численных исследований проблемы взаимосвязи микроструктуры кумулятивной облицовки и пробивающей способности кумулятивного заряда открывает широкие возможности в дальнейших исследованиях, в том числе при моделировании кумулятивных облицовок с более мелким зерном и при различных модификациях математической постановки задачи.

### Литература

1. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2 / под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
2. Zuev, L.B. *Elastoplastic Strain Invariant of Metals* / L.B. Zuev, S.A. Barannikova, A.G. Lunev // *Usp. Fiz. Met.* – 2019. – Vol. 19, № 4. – P. 379–417. DOI: 10.15407/ufm.19.04.379
3. Козлов, ЭВ. *Зеренная структура, геометрически необходимые дислокации и частицы вторых фаз в поликристаллах микро- и мезоуровня* / ЭВ. Козлов, Н.А. Конева, Н.А. Попова // *Физ. мезомеханика.* – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 93–106.
4. Пат. 2180723 РФ, МПК F42B1/036, B21D22/14. *Способ изготовления осесимметричной облицовки кумулятивного заряда* / Э.И. Владыкин, А.Е. Курепин, В.А. Семин. – № 2000125292/02, заявл. 10.05.2000; опублик. 20.03.2002.
5. *Технология изготовления облицовок кумулятивных зарядов, обладающих повышенной пробивной способностью* / В.В. Калашиников, Д.А. Деморецкий, О.В. Трохин и др. // *Известия Самар. науч. центра РАН.* – 2011. – № 1-2. – С. 373–376.
6. Минин, В.Ф. *Технология изготовления анизотропной облицовки кумулятивного заряда* / В.Ф. Минин, О.В. Минин, И.В. Минин // *Вестник СГУГиТ (Сибир. гос. ун-та геосистем и технологий).* – 2016. – Т. 36, № 4. – С. 237–242.
7. Кондратьев, Н.С. *Многоуровневые модели пластичности многофазных поликристаллических материалов, основанные на физических теориях пластичности и вязкопластичности* / Н.С. Кондратьев, П.В. Трусов // *Вестник ПНИПУ. Механика.* – 2015. – № 1. – С. 76–105. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.06
8. Yanov, D.V. *Simulation of dynamic channel angular pressing of copper samples using experimental data of loading* / D.V. Yanov, S.A. Zelepugin // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – Т. 1214. – Номер статьи 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012023



9. *Recrystallization in microcrystalline copper and nickel produced by equal-channel angular pressing: I. structural investigations. Effect of anomalous growth* / V.N. Chuvil'deev, V.I. Kopylov, A.V. Nokh-rin et al. // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2003. – Vol. 96, № 5. – P. 486–495.
10. *Elsukova, T.F. Mechanisms of severe plastic deformation of polycrystalline aluminum on a mesoscale upon cyclic loading* / T.F. Elsukova, V.E. Panin, Y.F. Popkova // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2011. – Vol. 2011, № 10. – P. 956–960. DOI: 10.1134/s0036029511100028
11. Воротилин, М.С. Анализ существующих технологий изготовления кумулятивных облицовок / М.С. Воротилин, Т.И. Дронова // *Известия ТулГУ. Технич. науки*. – 2012. – № 11-1. – С. 329–335.
12. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика зернограничного скольжения в деформируемом поликристалле / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, Т.Ф. Елсукова // *Физ. мезомеханика*. – 2011. – № 6. – С. 15–22.
13. Шарифуллина, Э.Р. Обзор экспериментальных исследований структурной сверхпластичности: эволюция микроструктуры материалов и механизмы деформирования / Э.Р. Шарифуллина, А.И. Швейкин, П.В. Трусов // *Вестник Пермского нац. исследоват. политехн. ун-та. Механика*. – 2018. – № 3. – С. 103–127. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.11
14. *Meyers, M.A. Mechanical Metallurgy: Principles and Applications* / M.A. Meyers, K.K. Chawla. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984. – P. 688–731.
15. Панин, В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // *Физ. мезомеханика*. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 7–26. DOI: 10.1016/j.physme.2011.12.002
16. *Marinin, M.A. Modeling of the Welding Process of Flat Sheet Parts by an Explosion* / M.A. Marinin, S.V. Khokhlov, V.A. Isheyskiy // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 237. – P. 275–280. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.20
17. *Wu, H. A comparative study for the impact performance of shaped charge JET on UHPC targets* / H. Wu, F. Hu, Q. Fang // *Defence Technology*. – 2019. – P. 506–518. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.005
18. *Experimental and numerical study on the meso-scopic characteristics of metal composites jets by a shaped charge* / F. Wang, D. Ma, P. Wang et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 126 (9). – Number article 095901. DOI: 10.1063/1.5100781
19. *Liu, Y. Study on the overdriven detonation wave propagation in double-layer shaped charge* / Y. Liu, J. Yin, Z. Wang // *Physics of Fluids*. – 2019. – Vol. 31 (9). – Number article 092110. DOI: 10.1063/1.5112772
20. *Xu, W. The jet formation and penetration capability of hypervelocity shaped charges* / W. Xu, C. Wang, D. Chen // *International Journal of Impact Engineering*. – 2019. – Vol. 132 (2019) – Number article 103337. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103337
21. Пат. 2478904С1 РФ. МПК F42В1/02. Устройство для формирования кольцевой кумулятивной струи / Д.В. Маляров, И.В. Жданов, И.Б. Тарасов. – № 2011144493/11; заявл. 02.11.2011; опубл. 10.04.2013.

**Гриф Екатерина Михайловна**, студентка 5-го курса, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, grif.2015@stud.nstu.ru.

**Гуськов Анатолий Васильевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Газодинамических импульсных устройств», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, a.guskov@corp.nstu.ru.

**Милевский Константин Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Газодинамических импульсных устройств», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, milevskij@corp.nstu.ru.

*Поступила в редакцию 7 ноября 2019 г.*

## INFLUENCE OF THE METAL MICROSTRUCTURE ON THE JET FORMATION PROCESS

*E.M. Grif, grif.2015@stud.nstu.ru,*

*A.V. Guskov, a.guskov@corp.nstu.ru,*

*K.E. Milevsky, milevskij@corp.nstu.ru*

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

Based on a review of the scientific and technical literature, an analysis is made of the influence of the material's microstructure of the cumulative lining on the breakdown ability of cumulative charges: depending on the average diameter, strength of the boundaries, uniformity of shape, size and orientation of the grains of the metal. A model of the ideal metal structure of the cumulative cladding is advanced and substantiated. An assessment of the current level of development of technologies for the production of cumulative linings is carried out, promising technologies are considered, the possibility of creating cumulative linings with the required microstructure is evaluated. Based on the assumption of the indivisibility and integrity of the metal's grain, based on the postulates of the mesomechanical phenomenon of grain-boundary sliding, the idea is put forward that it is possible to conduct numerical experiments on the formation of cumulative jets with a different set step of the computational grid. A numerical calculation of the functioning of the cumulative charges of a conical and complex conical-annular shape of the lining for the side of the grain cell of 500, 250 and 125  $\mu\text{m}$  is carried out. The efficiency of the jet formation process is visually assessed depending on the grain size according to the parameters distinguished: the directions of the velocity vectors of the material grain cells, and also the parameter  $\gamma$  is introduced – the angle between the reduced velocity vector of the head of the jet and the axis of symmetry of the jet formation. The results correlate with existing knowledge about the physics of the cumulation process: as the size of the side of the cell-grain decreases, the direction of the metal flow increases, the shape of the head of the jet “stretches”. The proposed method for numerical studies of the relationship between the microstructure of the cumulative lining and the breakdown ability of the cumulative charge opens up wide opportunities for further research, including when modeling cumulative facings with finer grains and for the various modifications of the mathematical formulation of the problem.

*Keywords: cumulation, grain size, shaped-charge jet, shaped-charge lining.*

### References

1. Orlenko L.P. (Ed.) *Fizika vzryva* [Explosion Physics]. Moscow, 2004. 656 p.
2. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G. [Elastoplastic Strain Invariant of Metals]. *Usp. Fiz. Met*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 379–417. (in Russ.) DOI: 10.15407/ufm.19.04.379
3. Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A. [Grain Structure, Geometrically Necessary Dislocations and Particles of the Second Phases in Microcrystals of the Micro- and Mesoscale]. *Phys. Mesomech.*, 2009, no. 4, pp. 93–106. (in Russ.)
4. Vladykin E.I. Kurepin A.E. Semin V.A. *Sposob izgotovleniya osesimmetrichnoy oblitsovki kumulyativnogo zaryada* [A Method of Manufacturing an Axisymmetric Lining of the Cumulative Charge]. Patent RF, no. 2180723, 2002.
5. Kalashnikov V.V., Demoretskiy D.A., Trokhin O.V., Rogozhin P.V., Nenashev M.V. [The Technology of Manufacturing Facings of Cumulative Charges with Increased Breakdown Ability]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, no. 1-2, pp. 373–376. (in Russ.)
6. Minin V.F., Minin O.V., Minin I.V. [Manufacturing Technology of Anisotropic Cladding of a Cumulative Charge]. *Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2016, vol. 36, no. 4, pp. 237–242. (in Russ.)
7. Kondratev N.S., Trusov P.V. [Multilevel Models of Crystal Plasticity and Viscoplasticity in Multiphase Polycrystalline Materials]. *Bulletin of PNRPU Mechanics*, 2015, no. 1, pp. 76–105. (in Russ.) DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.06

8. Yanov D.V., Zelepugin S.A. Simulation of Dynamic Channel Angular Pressing of Copper Samples Using Experimental Data of Loading. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019, vol. 1214, number article 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012023

9. Chuvil'deev V.N., Kopylov V.I., Nokhrin A.V., Makarov I.N. et al. Recrystallization in Microcrystalline Copper and Nickel Produced by Equal-Channel Angular Pressing: I. Structural Investigations. Effect of Anomalous Growth. *The Physics of Metals and Metallography*, 2003, vol. 96, no. 5, pp. 486–495.

10. Elsukova T.F., Panin V.E., Popkova Y.F. Mechanisms of Severe Plastic Deformation of Polycrystalline Aluminum on a Mesoscale upon Cyclic Loading. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011, vol. 2011, no. 10, pp. 956–960. DOI: 10.1134/s0036029511100028

11. Vorotilin M.S., Dronova T.I. [Analysis of Existing Technologies for the Manufacture of Cumulative Facings]. *Bulletin of the TSU. Technical science*, 2012, no. 11-1, pp. 329–335. (in Russ.)

12. Panin V.E., Egorushkin V.E., Yelsukova T.F. [Physical Mesomechanics of Grain Boundary Sliding in a Deformable Polycrystal]. *Phys. mesomech.*, 2011, no. 6, pp. 15–22. (in Russ.)

13. Sharifullina E.R., Shveykin A.I., Trusov P.V. [Review of Experimental Studies on Structural Superplasticity: Internal Structure Evolution of Material and Deformation Mechanisms]. *Bulletin of PNRPU Mechanics*, 2018, no. 3, pp. 103–127. (in Russ.) DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.11

14. Meyers M.A., Chawla K.K. Mechanical Metallurgy: Principles and Applications. *Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall*, 1984, pp. 688–731.

15. Panin V.E., Egorushkin V.E. [Deformable Solid as a Nonlinear Hierarchically Organized System]. *Phys. Mesomech.*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 7–26. (in Russ.) DOI: 10.1016/j.physme.2011.12.002

16. Marinin M.A., Khokhlov S.V., Isheyskiy V.A. Modeling of the Welding Process of Flat Sheet Parts by an Explosion. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 275–280. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.20

17. Wu H., Hu F., Fang Q. A Comparative Study for the Impact Performance of Shaped Charge JET on UHPC Targets. *Defence Technology*, 2019, pp. 506–518. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.005

18. Wang F., Ma D., Wang P., Liu J., Jiang J. Experimental and Numerical Study on the Mesoscopic Characteristics of Metal Composites Jets by a Shaped Charge. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126 (9), number article 095901. DOI: 10.1063/1.5100781

19. Liu Y., Yin J., Wang Z. Study on the Overdriven Detonation Wave Propagation in Double-Layer Shaped Charge. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31 (9), number article 092110. DOI: 10.1063/1.5112772

20. Xu W., Wang C., Chen D. The Jet Formation and Penetration Capability of Hypervelocity Shaped Charges. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, vol. 132 (2019), number article 103337. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103337

21. Malyarov D.V., Zhdanov I.V., Tarasov I.B. *Ustroystvo dlya formirovaniya kol'tsevoy kumulyativnoy strui* [Device for Forming an Annular Cumulative Jet]. Patent RF, no. 2478904C1, 2013.

*Received 7 November 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гриф, Е.М. Влияние микроструктуры металла на процесс струеобразования / Е.М. Гриф, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 28–38. DOI: 10.14529/engin190404

### FOR CITATION

Grif E.M., Guskov A.V., Milevsky K.E. Influence of the Metal Microstructure on the Jet Formation Process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 28–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190404

---