

УДК 621.7.04 + 532.135

ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМИРОВАННОГО СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ЕГО ПРОБИВАНИИ

А. А. Штерцер^{*,**}, Б. С. Злобин^{*}, В. В. Киселев^{*},
С. Д. Шемелин^{*}, П. А. Букатников^{*}

^{*} Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

^{**} Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: asterzer@mail.ru, zlobin.boris@mail.ru, vkiselev@ngs.ru,
s-shem@yandex.ru, pavelbukatnikov@yandex.ru

Методом циклического ударного прессования получены объемные образцы из чистого сверхвысокомолекулярного полиэтилена, а также объемные образцы, армированные металлическими прослойками (стальными сетками и перфорированными титановыми пластинами). Проведены эксперименты, в которых исследованы свойства компактов из сверхвысокомолекулярного полиэтилена с металлическими прослойками и без них при пробивании свинцовым шариком (дробью) диаметром 8 мм, летящим со скоростью, приблизительно равной 370 м/с. Экспериментально определена глубина проникания дроби в компакт. Для оценки глубины проникания сферического тела в полимер предложена модель, описывающая движение шара в этой среде.

Ключевые слова: циклическое ударное прессование, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, компакт, армирующие прослойки, пробивание, вязкость, прочность.

DOI: 10.15372/PMTF20200319

Введение. В работах [1–3] показано, что метод циклического ударного прессования (ЦУП) может применяться при изготовлении плотных и прочных компактов из порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), имеющего очень большую молярную массу (порядка 10^6 г/моль) и высокую вязкость в расплавленном состоянии ($10^4 \div 10^6$ Па·с [4]). Использование метода ЦУП позволяет получать не только однородный материал, но и композиты на основе СВМПЭ с нанодобавками [2] и армирующими металлическими вставками [3]. Поэтому при изготовлении композиционных изделий относительно небольших размеров метод ЦУП имеет преимущества по сравнению с широко используемыми методами горячего прессования и плунжерной экструзии [5–8]. Область применения изделий, изготавливаемых из СВМПЭ, чрезвычайно широка, что обусловлено высокой прочностью, износостойкостью, низким коэффициентом трения и рядом других свойств этого материала. Кроме того, СВМПЭ имеет высокую прочность при динамическом нагружении, в том числе при баллистическом ударе, что позволяет использовать его при изготовлении индивидуальных средств защиты, обеспечивая существенное уменьшение их массы [5–8]. Поэтому представляет интерес исследование свойств изготовленных

методом ЦУП компактов, в том числе армированных металлическими прослойками, при баллистическом ударе.

Как известно, прочность слоистых композитов полимер — металл при их пробивании превышает прочность чисто металлического слоя [9], поэтому применение метода ЦУП при изготовлении указанных выше изделий представляется перспективным. При этом прослойки из сеток или перфорированных пластин в полимере более предпочтительны, чем сплошные пластины, так как в последнем случае наблюдается отслоение полимера от металла на тыльной поверхности пластины, что может привести к отколу.

Целью настоящей работы является изучение возможности получения методом ЦУП сплошного (без расслоений компонентов) композиционного материала с матрицей из СВМПЭ и армирующими элементами в виде металлических прослоек, в том числе перфорированных, а также исследование свойств этого композиционного материала и компактов из чистого СВМПЭ при их пробивании.

1. Применяемые материалы и получение экспериментальных образцов.

В качестве основы при изготовлении экспериментальных образцов использовался порошок СВМПЭ марки GUR 4150 (изготовитель — компания Ticona (Германия)) с молярной массой $9,2 \cdot 10^6$ г/моль и размером частиц $120 \div 140$ мкм. При изготовлении компактов использовалась методика, описанная в [2]. Образцы представляли собой диски толщиной $8,3 \div 30,4$ мм и диаметром 61,2 мм. Для послойного армирования СВМПЭ применялась сетка из нержавеющей проволоки диаметром 0,25 мм, а также титановая лента толщиной 0,5 мм и пластины из титана толщиной 2 мм. В ленте и пластинах просверливались отверстия диаметром $2,7 \div 2,8$ мм, количество которых составляло $6 \div 7$ шт./см². Такой выбор армирующих элементов обусловлен тем, что в композиционных слоистых конструкциях, предназначенных для защиты от пробивания, наряду с неметаллическими используются различные металлические материалы (как алюминий [10], так и высокопрочные стали [11]). При этом роль армирующих элементов могут выполнять не только сплошные [10], но и перфорированные [11] пластины. В работе [11] показано, что наличие перфорации позволяет не только уменьшить массу конструкции, но и увеличить ее прочность при пробивании. В рассматриваемом случае, для того чтобы в результате серии ударов заполнить полимером отверстия в армирующем элементе и получить сплошную структуру, толщина перфорированного слоя должна быть минимально возможной.

Композиционные (армированные) образцы изготавливались следующим образом. В цилиндрическую матрицу с внутренним диаметром 61,2 мм засыпался порошок СВМПЭ, а затем прессовался статической нагрузкой 14 МПа. На поверхность уплотненного порошка помещалась вставка (стальная сетка, перфорированная титановая лента или титановая пластина в форме диска), затем засыпалась и уплотнялась следующая порция порошка СВМПЭ, на поверхность которого помещалась следующая вставка и т. д. Сборка подвергалась прессованию и нагревалась до температуры $T = 140$ °С. Затем проводилось циклическое ударное прессование. Количество циклов (ударов), необходимое для получения плотного (без пустот) компакта, определялось экспериментально с учетом размеров прессуемого образца и с использованием данных, полученных при прессовании образцов из чистого СВМПЭ, СВМПЭ с нанодобавками и изготовлении металлополимерного композита [2, 3].

На рис. 1 показаны армирующий элемент в виде перфорированного диска из титановой ленты толщиной 0,5 мм и поперечное сечение полученного методом ЦУП образца с пятью армирующими элементами, распределенными по его толщине. На рис. 2 представлен образец с 10 армирующими прослойками из нержавеющей сетки с размером ячейки 1×1 мм. Кроме того, были изготовлены образцы из СВМПЭ без армирующих элементов. На рис. 1, б, 2, б видно, что использование метода ЦУП позволяет получать материал без

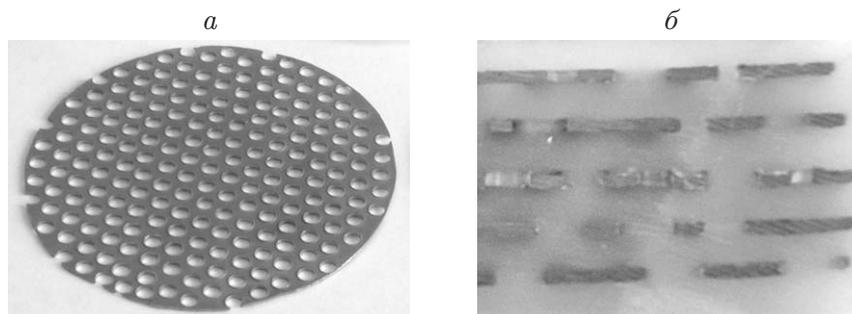


Рис. 1. Металлополимерный образец с пятью титановыми дисками:
a — перфорированный диск из титановой ленты, *б* — поперечное сечение образца

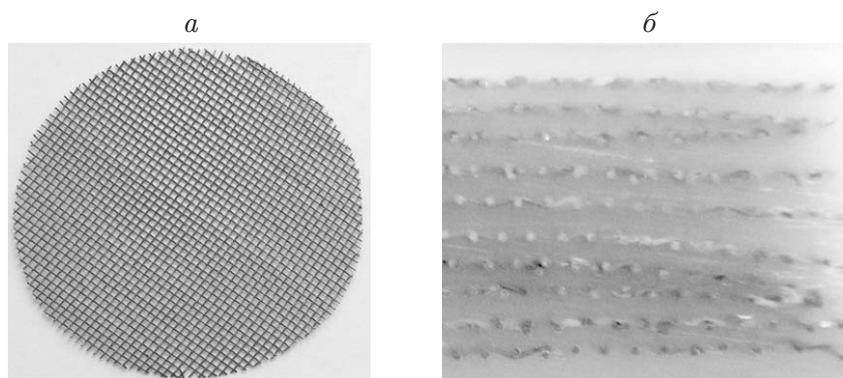


Рис. 2. Металлополимерный образец с 10 прослойками в виде сетки (нержавеющая сталь):
a — диск из сетки, *б* — поперечное сечение образца

пустот на границах полимера и металлических вставок. В проведенных ранее экспериментах обнаружено, что при деформации композита в условиях статического нагружения металлическая и полимерная составляющие не расслаиваются и его сплошность сохраняется [3].

На рис. 3 показана микроструктура композитов с матрицей из СВМПЭ и армирующими элементами из сетки из нержавеющей стали и перфорированной титановой ленты, полученные на сканирующем электронном микроскопе Merlin VP Compact (Zeiss). Видно, что ЦУП обеспечивает полный контакт полимерной матрицы и металлических элементов. Отсутствуют расслоения между проволочками сетки и окружающим их полимером (см. рис. 3, *a*). На рис. 3, *б* видно, что на металлической поверхности полимер заполняет даже неровности размером порядка 10^{-6} м. Вследствие этого композит представляет собой единое целое при статическом [2, 3] и, как показано ниже, при динамическом нагружении.

Для проведения динамических испытаний были изготовлены образцы в форме дисков диаметром 61,2 мм четырех типов:

1. СВМПЭ с пятью прослойками, изготовленными из титановой ленты толщиной 0,5 мм, с равномерно распределенными отверстиями (приблизительно 200 шт. в каждой прослойке) диаметром 2,7 мм. Суммарная площадь отверстий на одной титановой прослойке составляет приблизительно 38 % общей площади образца.

2. СВМПЭ с 10 прослойками — сетками из нержавеющей стали с диаметром проволоки 0,25 мм и размером ячейки 1×1 мм. Суммарная площадь отверстий одной сетки составляет приблизительно 56 % площади образца.

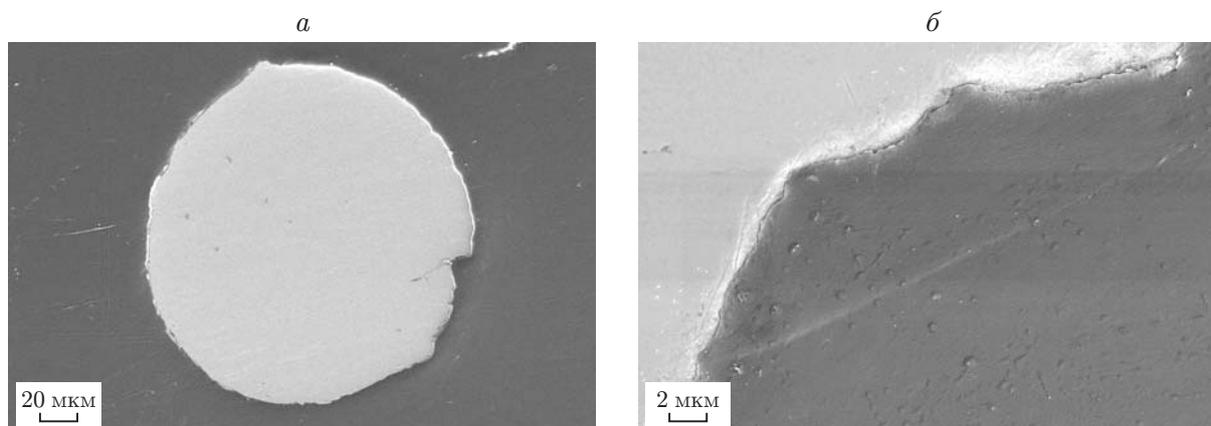


Рис. 3. Микроструктура композита, армированного сеткой из нержавеющей стали (а) и перфорированной титановой лентой (б): темная область — полимер, светлая — металл

3. СВМПЭ с одной перфорированной пластиной толщиной 2 мм, изготовленной из титана. Количество отверстий в пластинах было различным: а) 55 равномерно распределенных отверстий диаметром 2,8 мм с суммарной площадью, приблизительно равной 11 % площади образца; б) 199 равномерно распределенных отверстий диаметром 2,8 мм с суммарной площадью, приблизительно равной 41 % площади образца.

4. Чистый СВМПЭ без армирующих добавок.

2. Испытания образцов на пробивание. Для создания динамической нагрузки (баллистический удар) применялась свинцовая дробь из шариков диаметром 8 мм, массой 3 г, летящих со скоростью $v = 360 \div 370$ м/с в результате разгона пороховым зарядом. Скорость шариков измерялась контактным методом с использованием четырехлучевого цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS2014. На рис. 4 показаны образец из чистого СВМПЭ (толщина $\delta = 30,4$ мм, масса $m = 82,8$ г) и образец из СВМПЭ, армированный пятью перфорированными титановыми лентами ($\delta = 23,9$ мм, $m = 81,8$ г), после испытаний. Данные образцы не были пробиты дробью насквозь.

В результате экспериментов с образцами различной толщины установлено, что для образцов из СВМПЭ без армирования предельная по прочности толщина составляет $\delta \approx 20$ мм ($m = 53,6$ г), а для образцов из СВМПЭ с титановыми вставками $\delta \approx 14$ мм ($m = 53,1$ г). На рис. 5 видно, что армированный ($\delta = 13,9$ мм) и неармированный ($\delta = 20,0$ мм) образцы практически пробиты, в них застряла дробь.



Рис. 4. Образцы из чистого СВМПЭ толщиной 30,4 мм (а, б) и из СВМПЭ толщиной 23,9 мм, армированные пятью перфорированными титановыми лентами (в, г), после испытаний:

а, в — лицевая поверхность, б, г — тыльная поверхность

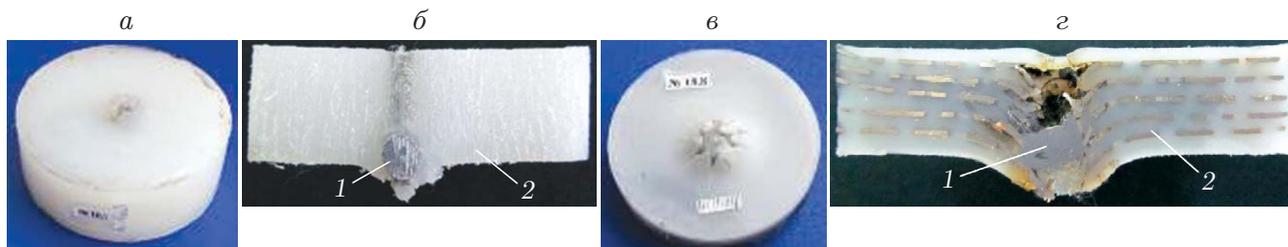


Рис. 5. Образцы из СВМПЭ после испытаний:

a, б — чистый СВМПЭ ($h = 20,0$ мм), *в, г* — СВМПЭ, армированный пятью перфорированными титановыми лентами ($h = 13,9$ мм); *a, в* — тыльная поверхность, *б, г* — поперечное сечение; 1 — свинец, 2 — СВМПЭ

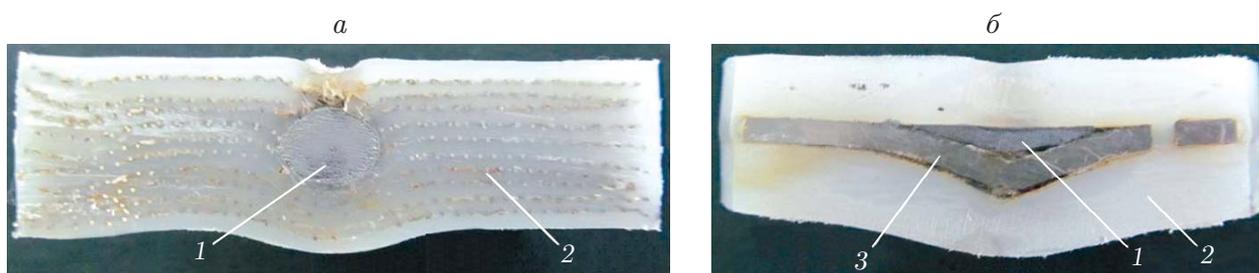


Рис. 6. Поперечные сечения образца с 10 слоями металлической сетки (*a*) и образца, армированного одной перфорированной титановой пластиной толщиной 2 мм с 55 отверстиями (*б*):

1 — свинец, 2 — СВМПЭ, 3 — титановая пластина

На рис. 6 показаны образец с 10 слоями сетки из нержавеющей стали ($\delta = 14,4$ мм, $m = 54,8$ г) и образец, армированный одной перфорированной титановой пластиной толщиной 2 мм с 55 отверстиями диаметром 2,8 мм ($\delta = 13,8$ мм, $m = 55,3$ г). Суммарная площадь отверстий в пластине составляет приблизительно 11 % площади образца. В случае, показанном на рис. 6, *a*, свинцовый шарик практически сохраняет первоначальную форму, а в случае, показанном на рис. 6, *б*, расплющивается о титановую пластину. При этом происходит отслоение полимера на тыльной поверхности титановой пластины.

Для того чтобы предотвратить отслоения, были изготовлены образцы, у которых площадь отверстий в армирующей титановой пластине была увеличена почти в четыре раза за счет увеличения их количества до 199 шт. Исследовано влияние положения металлической прослойки в образце на его прочность при пробивании. Для этого в одном из образцов перфорированная титановая пластина помещалась ближе к тыльной поверхности на расстоянии от его лицевой поверхности, составлявшем приблизительно $2/3$ общей толщины образца. В другом образце пластина располагалась на расстоянии, приблизительно равном $1/3$ его толщины. Результаты испытаний показаны на рис. 7. Видно, что перфорированная металлическая прослойка представляет собой своеобразную ловушку для свинцовой частицы (частица не пробивает образец насквозь) (см. рис. 7, *a*). При этом частица практически не расплющилась. В случае когда прослойка расположена ближе к лицевой поверхности образца, частица расплющивается значительно сильнее (см. рис. 7, *б*).

Очевидно, что по мере прохождения свинцовой частицы по образцу СВМПЭ ее скорость уменьшается, при этом чем больше глубина, на которой расположена прочная металлическая прослойка, тем меньше деформация частицы при соударении с ней. Результаты эксперимента показывают, что увеличение площади отверстий в титановой пластине с 11 до 41 % позволяет предотвратить отслоение полимера от металла.

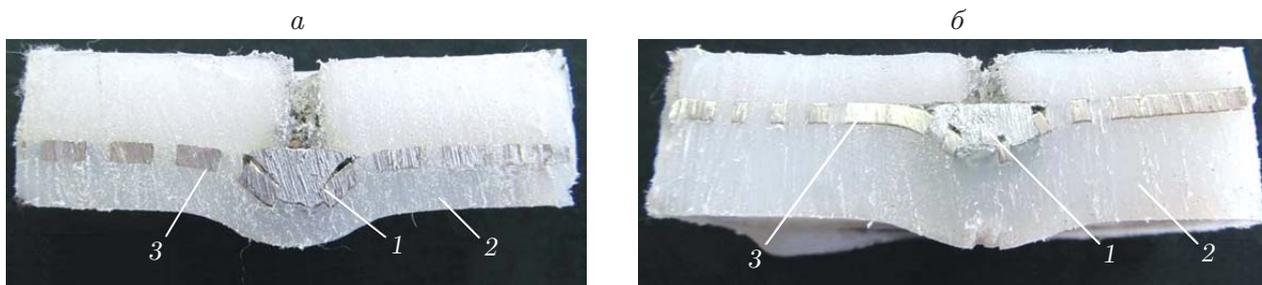


Рис. 7. Поперечные сечения образцов с одним армирующим слоем, представляющим собой перфорированную (199 отверстий) титановую пластину толщиной 2 мм:

a — пластина, расположенная ближе к тыльной поверхности образца, *б* — пластина, расположенная ближе к лицевой поверхности образца; 1 — свинец, 2 — СВМПЭ, 3 — титановая пластина

В результате экспериментов установлено, что при выполнении неравенства $\rho\delta > \rho_0\delta_0 = 1,9 \text{ г/см}^2$ (ρ — осредненная плотность композита (отношение массы образца к его объему); δ — толщина образца; $\rho_0 = 0,93 \text{ г/см}^3$ — плотность компакта из чистого (неармированного) СВМПЭ; $\delta_0 = 20 \text{ мм}$ — глубина проникания свинцовой частицы в компакт из чистого СВМПЭ) свинцовая частица диаметром 8 мм, летящая со скоростью 370 м/с, не пробивает материал на основе СВМПЭ.

3. Модель пробивания СВМПЭ. С использованием полученных экспериментальных данных построена достаточно простая аналитическая модель, приближенно описывающая движение сферического тела в полимере, и получена оценка вязкости СВМПЭ при скоростях деформаций, соответствующих описанным выше условиям пробивания образцов.

Будем считать, что процесс торможения свинцового шарика, проникающего в образец СВМПЭ с начальной скоростью v_0 , зависит от двух параметров — прочности σ и вязкости μ тормозящей среды. Тогда тормозящая сила F представляет собой сумму двух членов, один из которых зависит от σ , другой — от μ . Первый член запишем в виде $F_1 = S\sigma$, где $S = \pi d^2/4$ — площадь сечения шарика; d — диаметр шарика. Форма второго члена зависит от скорости шарика, т. е. от числа Рейнольдса Re . При движении сферы в вязкой жидкости в случае малых значений Re сила сопротивления пропорциональна скорости и рассчитывается по формуле Стокса $F_2 = 3\pi d\mu v$. При больших значениях Re сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости и рассчитывается по формуле Ньютона $F_2 = CS\rho v^2/2$, где C — коэффициент лобового сопротивления (зависит от Re и формы тела); ρ — плотность обтекающей шарик среды [12]. Формула Стокса справедлива при $Re \leq 1$, а формула Ньютона — при $Re > 700$, при этом для сферического тела $C = 0,44$. Как указано выше, СВМПЭ, как и другие полимеры, имеет очень большую вязкость. Обычно вязкость расплавов полимеров находится в диапазоне от 10 Па·с для полиамидов и полиэтилентерефталата до $10^4 \div 10^6$ Па·с для полиэтилена и пропилена [4]. Поскольку в рассматриваемом случае диаметр частицы $d = 8 \text{ мм}$, ее начальная скорость $v_0 = 370 \text{ м/с}$, плотность СВМПЭ $\rho = 0,95 \text{ г/см}^3$, при вязкости $\mu = 10^4 \div 10^6 \text{ Па·с}$ получаем число Рейнольдса $Re = dv_0\rho/\mu = 0,003 \div 0,300$. Таким образом, для расчета параметров торможения частицы свинца в СВМПЭ можно использовать формулу Стокса. В результате получаем выражение для силы сопротивления, тормозящей частицу, в виде

$$F = F_1 + F_2 = \pi d^2\sigma/4 + 3\pi d\mu v. \quad (1)$$

Поскольку $F = -m dv/dt$, где m — масса частицы; v — скорость частицы, из (1) получаем уравнение движения свинцового шарика в среде с вязкостью μ и прочностью σ :

$$\frac{dv}{dt} + av + b = 0. \quad (2)$$

Здесь

$$a = 18\mu/(\rho_p d^2), \quad b = 3\sigma/(2\rho_p d), \quad (3)$$

ρ_p — плотность материала частицы (шарика). В данном случае $\rho_p = 11,35$ г/см³. Коэффициенты a , b получены путем деления силы сопротивления на массу частицы, коэффициент a имеет размерность с⁻¹, b — м/с². Интегрируя (2), получаем зависимость скорости частицы от времени

$$v(t) = \left(v_0 + \frac{b}{a}\right) e^{-at} - \frac{b}{a}. \quad (4)$$

Приравнявая в (4) скорость к нулю, находим время, через которое частица остановится:

$$\tau = \frac{1}{a} \ln \left(1 + \frac{av_0}{b}\right). \quad (5)$$

Далее, интегрируя выражение (4) по времени, определяем зависимость длины пути частицы от времени

$$l(t) = \frac{1}{a} \left(v_0 + \frac{b}{a}\right) \left(1 - e^{-at}\right) - \frac{b}{a} t. \quad (6)$$

Наконец, подставляя выражение для τ (5) в соотношение (6), находим длину пробега частицы в среде, т. е. глубину пробивания

$$l_p = \frac{v_0}{a} \left[1 - \frac{b}{av_0} \ln \left(1 + \frac{av_0}{b}\right)\right]. \quad (7)$$

Как отмечено в п. 2, для чистого СВМПЭ при диаметре частицы (шарика) $d = 8$ мм, начальной скорости $v_0 = 370$ м/с и плотности $\rho_p = 11,35$ г/см³ (свинец) глубина пробивания l_p составила 20 мм. Приняв прочность СВМПЭ, полученного методом ЦУП, $\sigma = 20$ МПа [2], с использованием (7) можно оценить вязкость этого материала при большой скорости деформации в процессе пробивания. Данная задача упрощается, если вязкость оказывает наиболее существенное влияние на процесс торможения частицы, что имеет место при $b/(av_0) \ll 1$. В этом случае в (7) член, содержащий логарифм, можно не учитывать, тогда для оценки вязкости имеем формулу

$$\mu = \rho_p d^2 v_0 / (18l_p). \quad (8)$$

Подставляя в (8) указанные выше параметры, получаем $\mu = 747$ Па · с. При такой вязкости находим значение $b/(av_0) = \sigma d / (12\mu v_0) = 0,048$, существенно меньшее единицы, при этом в (7) член, содержащий логарифм, равен 0,15. Более точное решение для μ , в котором учитывается прочность, можно получить из (7), используя разложение логарифма в ряд в виде $\ln x \approx (x - 1)/x$ [13]. В результате имеем формулу

$$\mu = \rho_p d^2 v_0 / (18l_p) - \sigma d / (12v_0). \quad (9)$$

Из формулы (9) получаем $\mu = 747 - 36 = 711$ Па · с, т. е. различие значений, вычисленных по формулам (8) и (9), составляет 4,8 %. Эти оценки показывают, что основной вклад в торможение свинцового шарика вносит вязкость полимера. Для полученной вязкости число Рейнольдса равно $Re = dv_0 \rho / \mu = 3,76$, поэтому формула Стокса может быть использована для вычисления силы F_2 .

Полученное значение вязкости существенно меньше указанных выше значений $10^4 \div 10^6$ Па·с. Однако следует учитывать, что этот параметр существенно зависит от скорости деформации. Например, для алюминия при скорости деформации $\dot{\epsilon} \leq 10$ с⁻¹, соответствующей прокатке, $\mu = 10^6 \div 10^7$ Па·с, а при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^7$ с⁻¹, соответствующей высокоскоростному соударению тел, $\mu = 10^3 \div 10^4$ Па·с [14]. Оценим скорость деформации сдвига материала для рассматриваемого случая обтекания шарика диаметром $d = 8$ мм потоком вязкой жидкости с плотностью СВМПЭ $\rho = 0,95$ г/см³, движущейся со скоростью $v_0 = 370$ м/с. Согласно [15] толщина пограничного слоя равна

$$\delta = d/\sqrt{\text{Re}}. \quad (10)$$

Тогда для приведенных выше значений d , Re с использованием (10) получаем $\delta = 4,1$ мм. Поскольку при обтекании шарика потоком вязкой жидкости на расстоянии от его поверхности, равном толщине пограничного слоя, скорость потока уменьшается от значения $v = v_0$ до значения $v = 0$, получаем скорость деформации сдвига $\dot{\epsilon} = v_0/\delta = 9 \cdot 10^4$ с⁻¹.

Таким образом, если прочность полимера относительно невелика и торможение шарика определяется только вязкостью, то согласно (8) глубина его проникания в среду l_p прямо пропорциональна начальной скорости v_0 . В общем случае значение l_p вычисляется по формуле (7), которая при использовании приближенного соотношения $\ln x \approx (x - 1)/x$ преобразуется в выражение

$$l_p = \frac{v_0^2}{b(1 + av_0/b)} = \frac{2\rho_p dv_0^2}{3\sigma(1 + 12\mu v_0/(d\sigma))}. \quad (11)$$

В случае $av_0/b \ll 1$ выражение (11) сводится к более простой формуле

$$l_p = \frac{v_0^2}{b} = \frac{2\rho_p dv_0^2}{3\sigma}. \quad (12)$$

Таким образом, при малой прочности среды (по сравнению с напряжениями, обусловленными ее вязкостью) зависимость l_p от v_0 имеет линейный характер, а при большой прочности величина l_p пропорциональна квадрату v_0 .

4. Обсуждение результатов. Существует большое количество работ, посвященных численному моделированию процесса проникания высокоскоростных тел в различные преграды. В этих работах решаются сложные задачи, решение которых невозможно получить аналитическими методами. Тем не менее аналитические модели не утратили актуальности, поскольку обладают рядом преимуществ. В частности, они позволяют значительно быстрее выполнять оценочные расчеты.

В работе [16] приведен подробный обзор аналитических моделей, описывающих проникание твердых тел в металлические мишени, и выделено восемь моделей: 1) модель Понселе; 2) гидродинамическая модель; 3) модели, основанные на законах сохранения энергии и импульса; 4) модели, основанные на теории подобия; 5) модель Тэйта — Алексеевского; 6) модель жесткого пробойника; 7) модель, построенная на основе динамической пластичности, и модель Рэвида — Боднера; 8) модель Волкера — Андерсона. Следует отметить, что модели 1, 2, 5 являются гидродинамическими, а остальные — упругопластическими.

По сути, приведенные в п. 3 математические преобразования и формулы можно рассматривать как модель Понселе, но в отличие от предлагаемой модели в модели Понселе применяется формула Ньютона, а не Стокса. В результате уравнение Понселе отличается от (2) тем, что вместо члена av содержит av^2 .

Как указано в конце п. 3, при относительно малой прочности полимера σ глубина пробивания l_p пропорциональна v_0 , а при больших значениях σ пропорциональна v_0^2 . Очевидно, что в некоторой промежуточной области функция $l_p(v_0)$ может быть приближенно

описана степенной зависимостью $l_p = kv_0^n$, где $1 < n < 2$. Это подтверждается экспериментальными данными, полученными в работе [17], в которой исследовалось пробивание полимерной брони марки Дупеета® НВ26 стальным шариком диаметром 5,58 мм и массой 0,7 г. Броня изготовлена путем прессования волокон СВМПЭ марки Дупеета® SK76, выпускаемых компанией DSM NV. В [17] получена эмпирическая зависимость $l_p = kv_0^{1,68}$, где $k = 1,02 \cdot 10^{-7}$; скорость измеряется в метрах в секунду, глубина проникания — в метрах. Согласно данной эмпирической зависимости для скорости стального шарика $v_0 = 1000$ м/с получаем $l_p = 11,2$ мм. Для сравнения рассчитаем глубину пробивания полимерной брони с использованием модели, предложенной в настоящей работе. Согласно [17] прочность волокон СВМПЭ на растяжение равна $\sigma = 3,6$ ГПа. Очевидно, что прочность прессовки из таких волокон, т. е. прочность брони, должна быть меньше, но поскольку в [17] этот параметр не приводится, при вычислении l_p будем использовать указанное значение σ . Так как значение σ большое, используем формулу (12), откуда при $\rho_p = 7,8$ г/см³, $d = 5,58$ мм, $v_0 = 1000$ м/с получаем $l_p = 8,1$ мм, что близко к полученному выше значению $l_p = 11,2$ мм. Следовательно, предложенная в настоящей работе модель применима для описания движения металлического тела в полимерах. Если дополнить ее решением задачи о взаимодействии металлического тела с металлической прослойкой, то можно получить модель для слоистого композита.

Заключение. Проведенные в работе исследования позволяют сделать следующие выводы.

Использование метода ЦУП позволяет получать сплошной (без расслоений компонентов) композиционный материал с матрицей из СВМПЭ и армирующими элементами в виде металлических прослоек, в том числе перфорированных.

Сквозное пробивание полученных методом ЦУП слоистых композитов СВМПЭ — металл свинцовыми частицами диаметром 8 мм и массой 3 г, летящими со скоростью 370 м/с, происходит при условии $\rho\delta < 1,9$ г/см².

Увеличение степени перфорации армирующих прослоек из титановой пластины толщиной 2 мм более чем на 40 % позволяет предотвратить отслоение полимера от металла в процессе пробивания.

С использованием построенной аналитической модели, приближенно описывающей движение сферического тела в полимере при его пробивании, показано, что торможение тела в чистом СВМПЭ без армирующих элементов зависит в основном от его вязкости. На основе экспериментальных данных с использованием предложенной модели получено значение вязкости СВМПЭ $\mu = 711$ Па·с при скорости деформации $\dot{\epsilon} \approx 10^5$ с⁻¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jauffres D., Lame O., Vigier G., Dore F.** Microstructural origin of physical and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene processed by high velocity compaction // *Polymer*. 2007. V. 48, iss. 21. P. 6374–6383. DOI: 10.1016/j.polymer.2007.07.058.
2. **Злобин Б. С., Штерцер А. А., Киселев В. В. и др.** Циклическое ударное прессование порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *ПМТФ*. 2017. Т. 58, № 3. С. 68–76. DOI: 10.15372/PMTF20170308.
3. **Zlobin B. S., Shtertser A. A., Kiselev V. V., Shemelin S. D.** Impact compaction of ultra high molecular weight polyethylene // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 894. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012034.
4. **Вязкость** полимеров: Виртуальный справ. сварщика. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://svarka-info.com/content/вязкость-полимеров>.

5. **Михайлин Ю. А.** Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // Полимер. материалы. 2003. № 3. С. 18–21.
6. **Михайлин Ю. А.** Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // Полимер. материалы. 2003. № 4. С. 24–27. Продолж. Начало: № 3.
7. **Михайлин Ю. А.** Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // Полимер. материалы. 2003. № 6. С. 22–24. Продолж. Начало: № 3, 4.
8. **Михайлин Ю. А.** Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // Полимер. материалы. 2003. № 7. С. 16–19. Оконч. Начало: № 3, 4, 6.
9. **Roland C. M., Fragiadakis D., Gamache R. M.** Elastomer-steel laminate armor // Composite Structures. 2010. V. 92. P. 1059–1064. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.09.057.
10. **Guo Y. B., Chiang H. J., Deng J. J., Shim V. P. W.** Projectile impact on fabric-metal assemblies — Influence of fabric-metal sequence // Intern. J. Impact Engng. 2019. V. 127. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.01.004.
11. **Burian W., Źochowski P., Gmitrzuk M., et al.** Protection effectiveness of perforated plates made of high strength steel // Intern. J. Impact Engng. 2019. V. 126. P. 27–39. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.12.006.
12. **Соу С.** Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971.
13. **Двайт Г. Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы. Изд. 4-е. М.: Наука, 1973.
14. **Дерibas А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980.
15. **Ландау Л. Д.** Теоретическая физика: Учеб. пособие: В 10 т. Т. 4. Гидродинамика. 4-е изд., стер. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1988.
16. **Anderson Ch. E. (Jr.)** Analytical models for penetration mechanisms: a review // Intern. J. Impact Engng. 2017. V. 108. P. 3–26. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.018.
17. **Heisserer U., Van Der Werff H., Hendrix J.** Ballistic depth of penetration studies in dyneema[®] composites // Proc. of the 27th Intern. symp. on ballistics, Freiburg (Germany), Apr. 22–26, 2013. S. l.: DEStech Publ. Inc., 2013. V. 2. P. 1936–1943.

*Поступила в редакцию 27/VI 2019 г.,
после доработки — 22/XI 2019 г.
Принята к публикации 2/III 2020 г.*
