

УДК 621.7.014.8

А.М. Шнейберг, А.Е. Малов

ПРЕССОВАНИЕ СТРУЖКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ: СЖАТИЯ СО СДВИГОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено экспериментальное исследование компактования стружки способом – прессование плюс кручение. Дано сопоставление плотности и твердости по объему брикетов, полученных указанным способом и обычным прессованием.

Ключевые слова: деформация сжатия с кручением, стружка, плотность, твердость.

Вопросы утилизации металлических отходов в настоящее время достаточно актуальны. Обычно отходы заготовительного производства и стружка подвергаются брикетированию и вторичному переплавлению.

Менее энергоемким является процесс утилизации стружки с использованием метода, аналогичного методу порошковой металлургии: компактирование (прессование) с последующим спеканием; при этом получается готовый или почти готовый продукт.

Прочность и ударные характеристики такого изделия находятся в прямой зависимости от плотности (или обратной характеристики – пористости), которая формируется в основном на стадии прессования. На величину плотности влияет ряд основных факторов:

- вид прессования (одно- или двухстороннее, использование активных сил трения и т.д.);
- осевая сила;
- температура и скорость процесса прессования;
- силы трения между элементами стружки и между стружкой и инструментом;
- начальное состояние материала, его пластические и прочностные свойства;
- форма и размер частиц стружки и состояние ее поверхности и др.

Для получения больших степеней сжатия порошковых материалов, а для пластичных металлов – степени деформации ϵ , используются различные методы: прокатки, прессования, прессования (сжатия) с кручением инструмента по принципу наковальни Бриджмена. Последний метод наиболее эффективен, так как дополнительный сдвиг при осевом сжатии может увеличить величину ϵ на порядок, например, по сравнению с обычной осадкой [1-4]. Кроме того, интенсивная сдвиговая деформация, обусловленная кручением, приводит к разрушению окисной пленки на поверхности стружки, увеличивает площадь физически чистой (ювенильной) поверхности на ступеньках скольжения, что при наличии компонент сжатия приводит к соединению отдельных фрагментов по типу холодной сварки.

Целью работы являлась экспериментальная проверка эффективности прессования с кручением (ПК) по сравнению с простым прессованием (П) хрупкой силуминовой и пластичной медной стружки.

Определялись параметры: 1) плотность полученных брикетов после компактирования; 2) твердость по контактной торцовой поверхности и в диаметральном сечении брикета.

Прессование производилось на установке с независимыми осевым движением и круговым вращением инструмента [2]. Схема прессования односторонняя (рис.1).

Штамп имел ступенчатую втулку $\varnothing 27,2$ и матрицу $\varnothing 25$ мм. Максимальная «насыпанная высота» $h_n = 35$ мм. Торцовые поверхности матрицы и пуансона имели шероховатость $\sim R_a = 6,3$ мкм. Вращалась матрица, скорость вращения один оборот за 37 с. Производилась запись диаграммы сжатия $P - h_n$ (сила – ход пресса). Засыпаемая стружка сначала сжима-

лась силой, равной заданному фиксированному значению P_k . После прекращения осевого движения пуансона включалось вращение, и начинался процесс ПК.

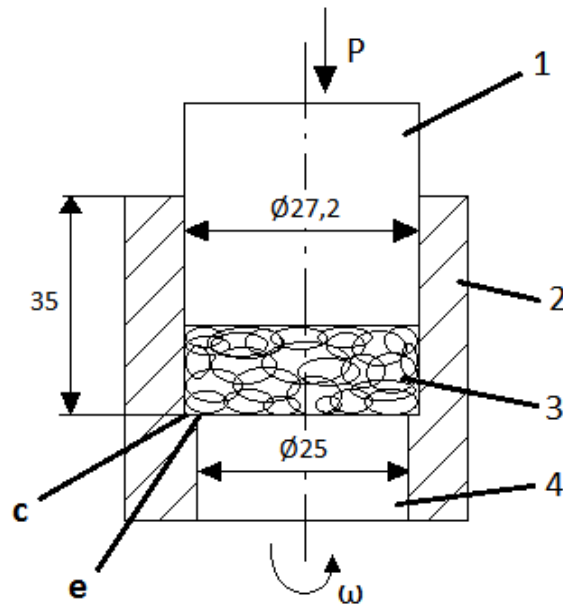


Рис. 1. Схема инструмента для одностороннего прессования с кручением:
1 – пуансон; 2 – втулка; 3 – стружка; 4 – матрица

При этом осевая сила сначала уменьшалась, а затем снова доводилась до значения P_k при вращающемся инструменте. Происходило дополнительное перемещение инструмента Δh , которое фиксировалось на диаграмме (рис. 2). Процесс ПК прекращался, когда прекращалось дополнительное осевое перемещение инструмента. Время от начала процесса ПК и до его стабилизации составляло 40...70 с. Использовалась стружка, получающаяся после точения на токарном станке силуминовой отливки и медного прутка. Она была разная по размеру, имела вид пластин толщиной 0,2...0,3 мм и длиной 1...10 мм. Медная сильноупрочненная стружка отжигалась при $650^{\circ}\text{C} \sim 1,5$ ч. Твердость медного прутка после такого отжига составляла HV_0 579. Она бралась за исходную для стружки. После механической очистки от окалины, промывки водой и сушки на поверхности стружки оставались все же заметные следы окислов.

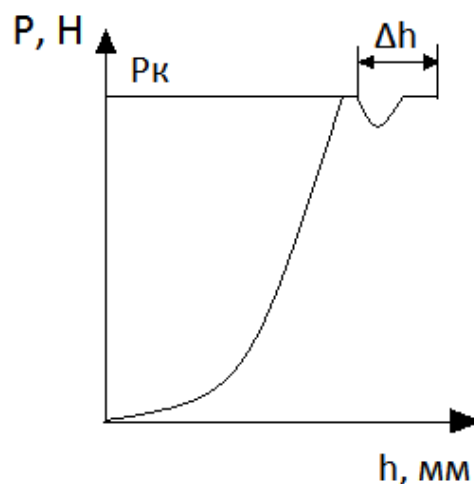


Рис. 2. Индикаторная диаграмма процесса ПК

Силуминовая стружка хрупкая и более мелкая, чем медная, отжигу не подвергалась. Исходная твердость HV₀ 960.

Измеренная плотность материала исходных образцов составляла: для силумина $\gamma = 2,965 \text{ г/см}^3$, для меди $\gamma = 8,88 \text{ г/см}^3$. Максимальная насыпная масса стружки выбиралась так, чтобы насыпная высота не превышала высоту втулки. Для каждого металла брались четыре партии по насыпной массе. Для силуминовой стружки насыпная масса партий составляла $M = 5; 7,5; 10$ и $15,5 \text{ г}$.

Для медной стружки насыпная масса бралась большей с учетом отношения $d_{\text{в}}/\gamma_{\text{алюм}}$, и составляла: 16,5; 24,7; 33 и 51,1 г. При этом насыпная высота для каждой партии того и другого металла была приблизительно равной.

Фиксированная сила сжатия $P_{\text{к}}$ (два значения) выбиралась, исходя из механических свойств компактируемого металла

$$P_{\text{к}} = S\sigma_z, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения контейнера, равная 581 мм^2 ; σ_z – нормальное напряжение.

Для силумина, хрупкого сплава, с характеристиками:

$$\sigma_{\text{в}} \cong 200 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\text{т}} \cong 160 \text{ МПа}; \quad \delta = 2\%$$

выбирались два напряжения:

$$\sigma_z = 0,86\sigma_{\text{в}} \quad \text{и} \quad \sigma_z = 1,5\sigma_{\text{в}}.$$

Для пластичной и сильноупрочняемой меди с характеристиками:

$\sigma_{\text{в}} \cong 230 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{т}} \cong 70 \text{ МПа}$; $\delta = 50...60\%$ и напряжением течения при степени деформации $= \ln \frac{h_0}{h} = 0,4$ равном $\sigma_{\text{е}} = 400 \text{ МПа}$, выбирались напряжения $\sigma_z = 0,86\sigma_{\text{е}=0,4} = 1,5\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_z = 1,5\sigma_{\text{е}=0,4} = 2,6\sigma_{\text{в}}$. Такие напряжения σ_z соответствовали осевой силе сжатия для силумина: $P_{\text{к}} = 100 \text{ кН}$ и 175 кН , для меди: $P_{\text{к}} = 200 \text{ кН}$ и 350 кН .

Во всех случаях, даже при $\sigma_z = 0,86\sigma_{\text{в}}$ (для силумина), величина σ_z превышала $\sigma_{\text{т}}$, т.е. во всех случаях предполагалось наличие пластической деформации в стружке.

Эффективность от кручения оценивалась показателем

$$n_{\text{эфф}} = \frac{\Delta h}{h_1} = \frac{\Delta h}{h_2 + \Delta h} 100\%, \quad (2)$$

где h_1 и h_2 – высота брикета до кручения (П) и после ПК.

Высота h_2 измерялась на образце, Δh – из диаграммы $P - h_n$ с учетом масштаба 1:50.

Относительная плотность после ПК оценивалась по формуле

$$\gamma''_{\text{отн}} = \frac{\gamma''}{\gamma}, \quad (3)$$

где γ'' , γ – средняя плотность брикета после ПК и исходного материала.

Относительная плотность брикета при прессовании по схеме П (без вращения) могла легко быть вычислена из формулы

$$\gamma'_{\text{отн}} = \gamma''_{\text{отн}} (1 - n_{\text{эфф}}). \quad (4)$$

Определялась твердость по Виккерсу некоторых брикетов после операции ПК и после простого прессования. Нагрузка на твердомер составляла 50Н, время выдержки 20 с. Твер-

дость измерялась на обеих торцовых поверхностях по диаметральной линии, а также в диаметральной сечении по высоте на разных расстояниях от осевой линии.

При вращении имело место проскальзывание, которое чаще всего происходило по нижнему торцу на линии «брикет-матрица» (рис. 1). Эта поверхность имела вид сплошного блестящего круга в отличие от матовой верхней, где проскальзывание отсутствовало или было слабым. Кроме того, на поверхности, не подвергнутой проскальзыванию, наблюдались границы стружек и тем заметнее, чем меньше усилие P и больше высота брикета.

За пределами круга проскальзывания $\geq \varnothing 25$ мм (на участке ce – рис. 1) плотность брикета была низкая, и имело место некоторое (учитываемое) осыпание стружки.

Этот фактор, а также неоднородная структура насыпной массы и неравномерность засыпки по объему приводили к достаточно заметному разбросу результатов измерения плотности и твердости особенно низких брикетов.

Высота брикетов h_2 для некоторых значений M и P дана в таблице.

Таблица

Насыпная масса стружки M , г	Сила прессования P , кН	Высота брикета h_2 , мм
Силумин		
5	100	3,6
	175	3,3
15,5	100	12,5
	175	10,84
Медь		
16,5	200	3,22
	350	3,08
51,1	200	10,31
	350	9,86

Из приведенных далее графиков зависимости показателя эффективности кручения $n_{эфф}$ и относительной плотности $\gamma_{отн}''$ от насыпной массы M (рис. 3, 4) следует:

- 1) для обоих металлов значения $n_{эфф}$ тем выше, чем меньше насыпная масса. Это объясняется тем, что доля объема стружки для низких брикетов, подвергаясь действию сдвига, выше;
- 2) значения $n_{эфф}$ тем выше, чем меньше сила P ;
- 3) эффект от кручения $n_{эфф}$ при одинаковых значениях σ_z , равных $1,5\sigma_B$ (ср. кривые 1 на рис. 3, а и 2 на рис. 4, а) для медной стружки более сильный;
- 4) относительная плотность $\gamma_{отн}''$ для того и другого металла тем выше, чем больше P , а при равных значениях σ_z , равных $1,5\sigma_B$ (кривые 1 на рис. 4, б и 2 на рис. 3, б) плотность выше у меди по сравнению с силумином ($\sim 95\%$ у меди против 90% у силумина);
- 5) плотность $\gamma_{отн}''$ тем выше, чем меньше M , что особенно заметно у хрупкой силуминовой стружки при $P = 100$ кН (рис. 4, б, кривая 2). Для медной стружки зависимость $\gamma_{отн}''(M)$ выражена слабо (рис. 3, б, кривые 1 и 2);
- 6) плотность медной стружки $\gamma_{отн}''$ близка к 100% особенно при малых значениях M и больших P (кривая 1 на рис. 3, б). Такая плотность ($\geq 98\%$) по классификации, применительной к порошковым материалам, соответствует высшей группе [4].

Следует отметить, что плотность брикета, который прессовался при включенном вращении инструмента с самого начала прессования, была значительно ниже, а реверсирование при вращении также не дало эффекта. Плотность брикета при обычном прессовании $\gamma_{отн}'$, определенная по формуле (3), почти-что всегда тем выше, чем меньше M , чего и следовало ожидать, принимая во внимание действие сил трения на стенках инструмента.

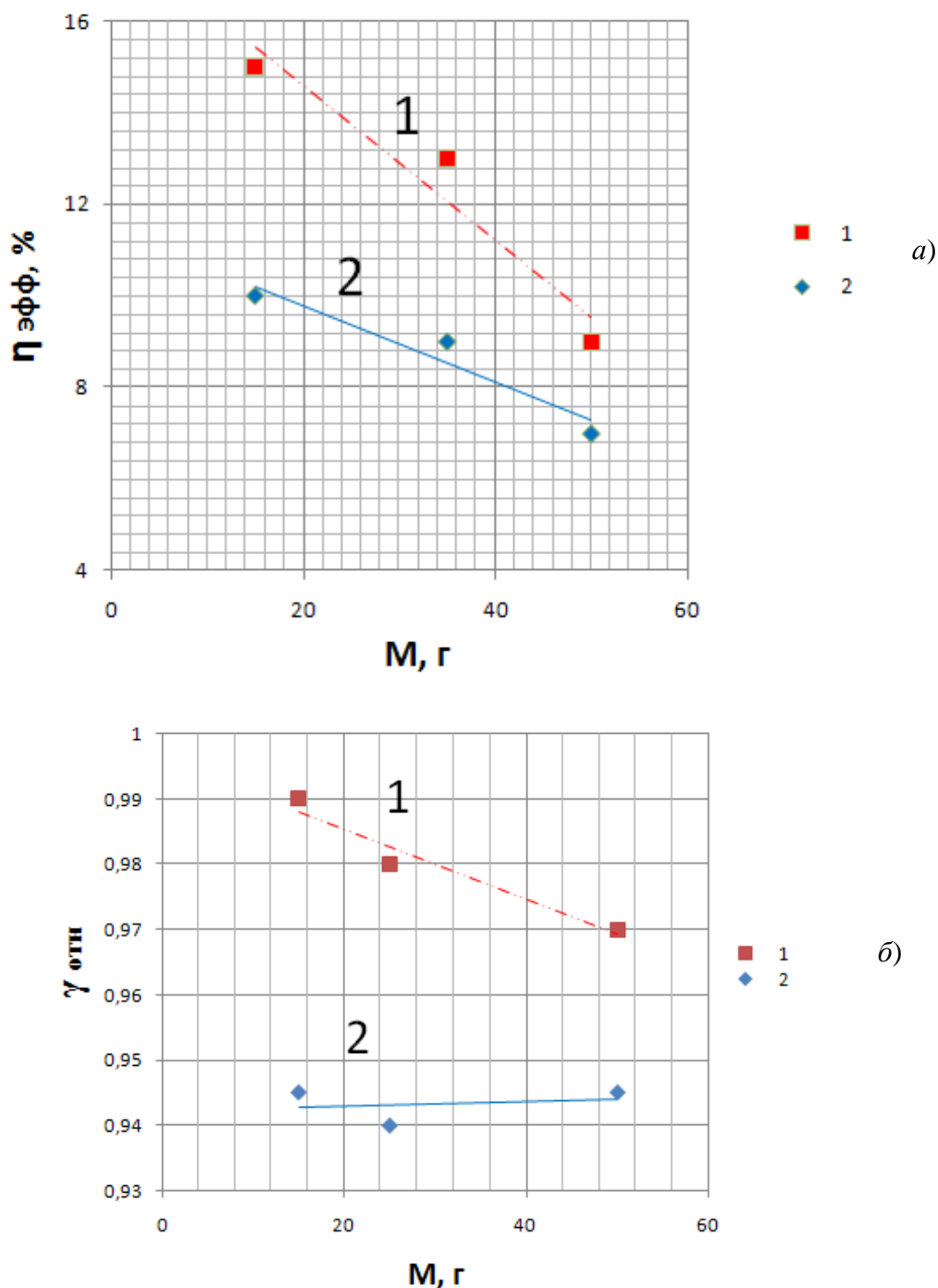


Рис. 3. Зависимость $\eta_{эфф} \%$ (а) и $\gamma_{отн}$ (б) от насыпной массы M медной стружки для разных значений P , кН:

1 – 200 ($\sigma_z = 1,5\sigma_B$); 2 – 350 ($\sigma_z = 2,6\sigma_B$)

Твердость $HV(r)$, где r – радиус у медных брикетов, была выше на той поверхности, по которой происходило проскальзывание (HV_1), по сравнению с той, где оно отсутствовало (HV_2). Особенно сильно это заметно на высоких брикетах ($h = 9,8$ мм; $P = 350$ кН) – рис. 5, кривые 1 и 2. Отношение $\frac{HV_1}{HV_2}$ на участке $r = 12$ мм составляет 1,6, а на оси – 1,2. На низком медном брикете ($h = 3,08$ мм, $P = 350$ кН) твердость распределена более равномерно (график не приведен) и аналогичное соотношение составляет 1,05 и 1,1.

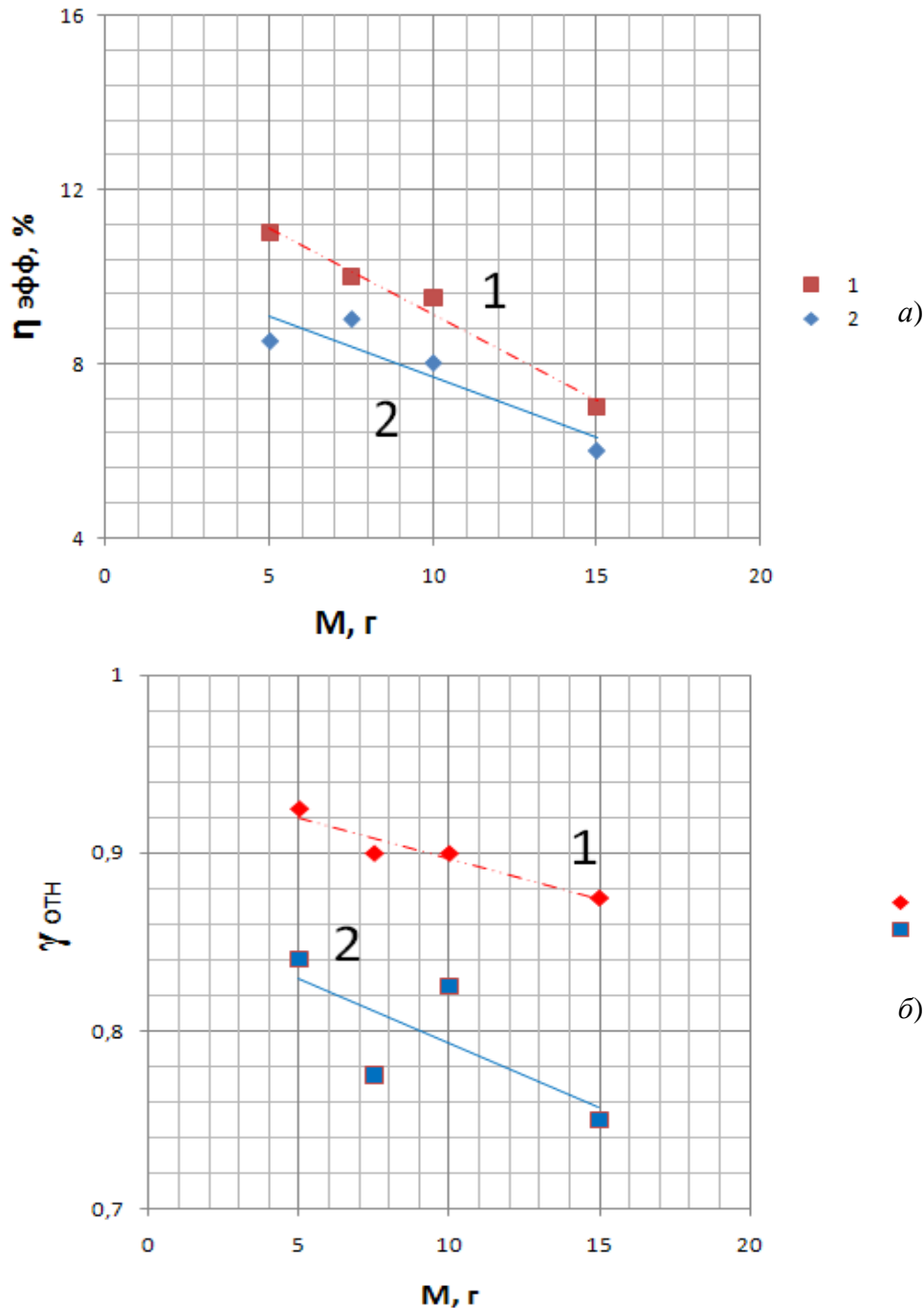


Рис. 4. Зависимость $\eta_{эфф} \%$ (а) и $\gamma_{отн}$ (б) от насыпной массы M силуминовой стружки для разных значений P , кН:

1 – 100 ($\sigma_z = 0,86 \sigma_B$); 2 – 175 ($\sigma_z = 1,5 \sigma_B$)

Средняя твердость на торцах высокого образца из кривой $HV(r)$ составляет 1580 МПа. Средняя твердость по торцам низкого образца выше и составляет 1880 МПа. Так как твердость зависит от упрочнения материала стружки и ее уплотнения, то приведенную ранее зависимость можно объяснить тем, что сдвиговая деформация и уплотнение на низком брикете (соотношение $h/d = 0,13$) охватывают по сравнению с брикетом высоким ($h/d = 0,41$) весь или почти весь объем. Об этом же свидетельствует и зависимость $HV(h)$ – рис. 6, а именно, твердость в средней по высоте части высокого медного брикета значительно ниже, чем на торцовых поверхностях, а средняя твердость в диаметральном сечении составляет ~ 1200 МПа.

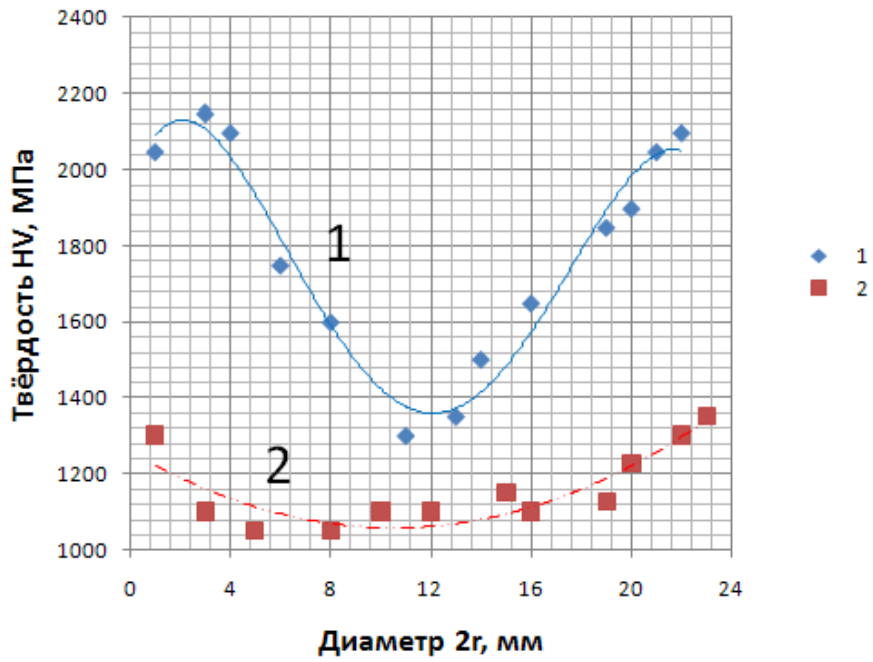


Рис. 5. Зависимость HV от радиуса r медного брикета при $P = 350$ кН и $M = 51,1$ г на торцовых поверхностях:

1 – нижней (с проскальзыванием); 2 – верхней (без проскальзывания)

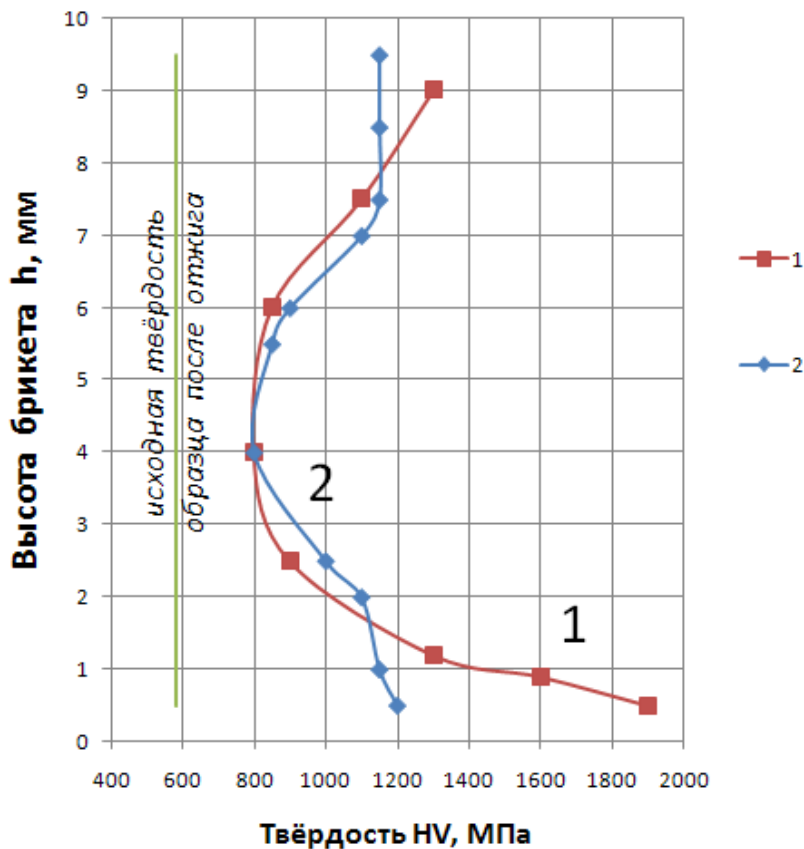


Рис. 6. Зависимость HV от высоты h медного брикета при $P = 350$ кН и $M = 51,1$ г на разном расстоянии от оси:

1 – $r = 10$ мм; 2 – $r = 0$

Твердость, как это следует из зависимости $HV(r)$ на периферии, как следовало ожидать, выше из-за интенсивной сдвиговой деформации, обусловленной кручением, в 1,6...1,7 раз, чем на осевой линии, где скорость сдвига от кручения = 0.

В сравнении с исходной твердостью, твердость высокого медного брикета на периферии возросла в 3,8 раз, на оси в $\sim 2,2$ раза на торце, где имело место проскальзывание и в 2,3 и 1,9 раз – на торце без проскальзывания.

Исходя из прямопропорциональной зависимости

$$\frac{HV_0}{HV} \approx \frac{\sigma_0}{\sigma}, \quad (5)$$

где $\sigma_0 = \sigma_T$. σ – напряжение течения на кривой упрочнения, можно приближенно оценить степень деформации отожженной медной стружки, используя зависимости $\sigma(\epsilon)$ [5]. Из них следует, что величина ϵ на периферийном участке $\sim 0,4...0,5$, на осевой линии $\sim 0,1...0,15$. Таким образом, сдвиговая пластическая деформация эффективно повышает не только плотность, но и упрочняет дисперсный материал.

Твердость торцевой поверхности медного брикета ($\mu = 51,1$ г, $P = 350$ кН) после обычного прессования слабо изменяется в зависимости от радиуса и в среднем составляет HV910. Это несколько выше исходной. Но значительно ниже средней твердости брикета, полученного методом ПК. Таким образом, дополнительный сдвиг увеличивает более чем в 1,7 раз среднюю твердость брикета из пластичной стружки.

Заметим, что плотность и твердость – две разные и независимые друг от друга характеристики: плотность обусловлена уменьшением процентной доли пор, а твердость – наклепом. При компактировании оба процесса идут совместно.

Зависимость $HV(r)$ силуминового брикета (высота 10,84 мм, $P = 17,5$ т) после ПК отличается несколько от медного значительно большим разбросом точек – рис. 7.

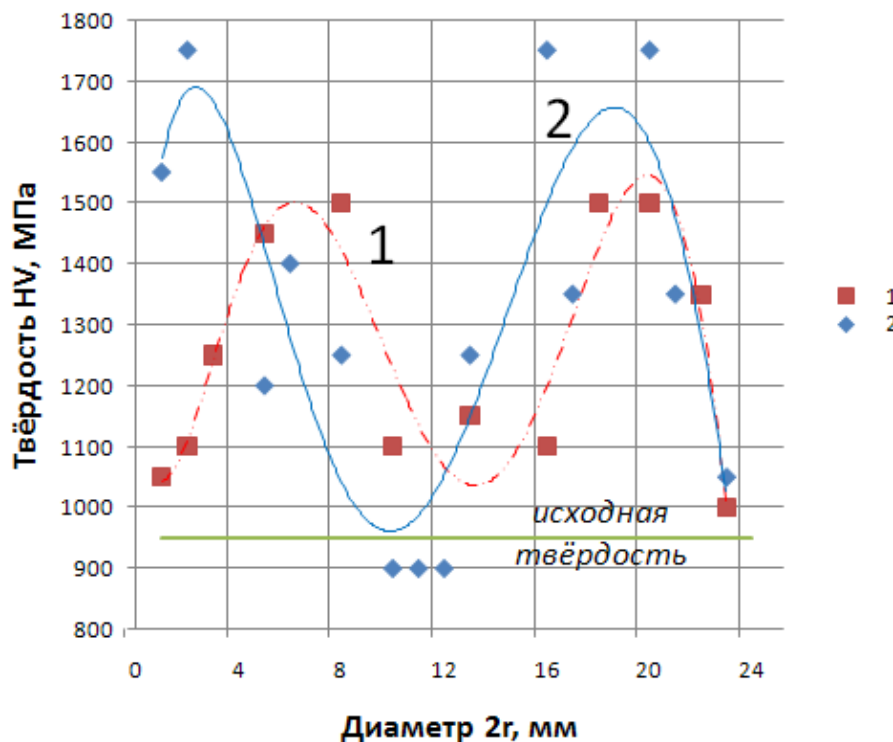


Рис. 7. Зависимость HV от радиуса r силуминового брикета при $P = 175$ кН и $M = 15,5$ г на торцевых поверхностях:
1 – нижней (с проскальзыванием); 2 – верхней (без проскальзывания)

Для обеих торцовых поверхностей прослеживаются пики на расстоянии от оси, равные примерно $\frac{1}{2} r \dots \frac{2}{3} r$. Сопоставление с исходной твердостью составляет $\frac{1650}{960} = 1,7$ раз – вдвое меньше, чем для меди. А определить степень деформации силуминовой стружки не представляется возможным из-за отсутствия в справочной литературе зависимостей $\sigma(\epsilon)$ для этого хрупкого литейного сплава.

«Двугорбая» зависимость $HV(r)$ для силуминовой стружки коррелирует с величиной степени пластической деформации при комбинированной осадке [1], а также при обратном выдавливании с вращением сплава АМц [6], где максимальный сдвиг имел место на $\frac{1}{2} r$. Заметим, что и для меди на графике $HV(r)$ наблюдается «выполаживание» кривой $HV(r)$ на периферийном участке. Это различие между видом графиков $HV(r)$ у силумина и меди обусловлено их различной упрочняемостью и разными коэффициентами трения: у силумина величина μ на 25...30% выше, чем у меди [7], а большой разброс твердости у силуминовой стружки на торце с проскальзыванием можно объяснить тем, что поверхность имела чешуйчатый вид, т.е. имела следы разрушения.

Следует отметить, что средняя твердость на торце силуминового брикета после обычного прессования, так же, как и у медного брикета, слабовыраженная в отношении $HV(r)$, составила HV805. Это значение даже ниже значения исходной твердости, что свидетельствует не только об отсутствии упрочнения, но и о рыхлости брикета. Сравнивая эту величину с твердостью силуминового брикета после ПК (HV1650), можно сделать вывод, что даже хрупкий сыпучий материал с использованием указанного метода способен деформироваться и упрочняться. Это объясняется влиянием «мягкой» схемы напряженного состояния: всестороннее сжатие + сдвиг.

Выводы

1. Исследовано влияние осевого кручения инструмента на прессование медной и силуминовой стружки при разных значениях осевой силы и массы навески.
2. При включении вращения происходит дополнительное осевое перемещение инструмента, что приводит к увеличению плотности прессуемого материала.
3. Эффект от кручения (показатель $n_{эфф}$) для пластичного материала составляет от 10 до 15%, а для хрупкого – 6...9%, и тем сильнее, чем меньше отношение h/d и осевая сила.
4. Средняя твердость брикетов, особенно медных, полученных методом ПК, значительно выше, чем при обычном прессовании, и неоднородна по объему. Наибольшее ее значение имеет место на периферийном участке, где сдвиг максимален, а также на той торцовой поверхности, где преобладает проскальзывание.
5. Метод ПК позволяет не только эффективно уплотнять брикет из хрупкой силуминовой стружки, но и упрочнять его, благодаря мягкой схеме напряженного состояния.

Библиографический список

1. Штамповка с кручением: монография / В.Н. Субич [и др.]. – М.: МГИУ. 2008. – 389 с.
2. Шнейберг, А.М. Анализ силового режима и методов оценки накопленной деформации при комбинированном нагружении / А.М. Шнейберг [и др.]. // Тяжелое машиностроение. 2006. № 3. С. 8–11.
3. Утяшев, Ф.З. Связь между деформированным и структурным состоянием металла при интенсивной пластической деформации // КШП и ОМД. 2011. № 5. С. 33–36.
4. Технология конструкционных материалов: учебник / под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2003. – 513 с.
5. Полухин, П.М., Гун, Г.Я., Галкин, А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1976, 488 с.

6. Шнейберг, А.М. Приближенная оценка и экспериментальная проверка силовых затрат и сдвиговых деформаций при комбинированном обратном выдавливании стаканов / А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко, О.С. Кошелев // КШП и ОМД. 2002. № 5. С. 3–12.
7. Контактное трение в процессе обработки металлов давлением / А.Н. Леванов [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2015*

A.M. Schneiberg, A.E. Malov

**PRESSING OF THE CHIPS WITH USING COMBINED LOADING:
COMPRESSION WITH TORSION**

The Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

Purpose: To study the possibility of obtaining a high briquettes density of brittle and ductile chips by the new process providing a intensive deformations.

Approach: Performed an experimental study of the process of compacting chips using a combined method of pressing with torsion.

Findings: There are carried out evaluation of the effectiveness of the new process compared of conventional compressing on the data obtained by measuring the density and hardness of copper and aluminum alloys chip-brick.

Research implications: The present study showed that the new method of compacting provide not only the density to levels close to the density of monolithic material, but also significantly strengthen the material.

Value: Recommend to use this method for compacting loose materials and in particular for the recycling of metal chips.

Key words: compression with torsion, chips, density, hardness.