

Д.О. БАБАЯН, Э. Г. АМБАРЦУМЯН

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТЫХ ТЕЛ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Установлен характер изменения степени деформации от прилагаемой энергии. Изучена динамика упруго-пластической деформации. Определены плоскости разрушения пористых тел с количественной и качественной оценкой. Доказано, что с увеличением скорости приложения нагрузки сопротивляемость пористого тела пластической деформации возрастает. Установлены оптимальные границы аксиальных и радиальных степеней деформации пористого тела высокоскоростным нагружением.

Ключевые слова: деформация, пористое тело, высокоскоростное нагружение, макрошлиф.

Высокоскоростное формование с мгновенно возрастающим давлением является одним из основных технологических процессов получения различных порошковых изделий высокой плотности [1].

Деформируемость исследовалась на образцах размерами $\varnothing 10 \times 10$, 15×15 , 20×20 мм, осажденных в матрице $\varnothing 25$ мм на пороховом копре по схеме I (с промежуточным телом) [2], а также на образцах $\varnothing 30 \times 30$ и $\varnothing 60 \times 60$ мм - матрице $\varnothing 81,7$ мм по схеме II (без промежуточного тела); пористость заготовок - 20%, а материал - порошки железа и меди марок ПЖ2М и ПМО. Образцы деформировались до получения минимальной пористости, исходя из стойкости инструмента (табл. 1, рис. 1 и 2).

Таблица 1

Сводные данные деформирования геометрически подобных медных спеченных заготовок ($\varnothing 10 \times 10$ и $\varnothing 15 \times 15$ мм - $P_0 = 10\%$, $m_c = 1,14$ кг, $m_n = 0,21$ кг и $\varnothing 20 \times 20$ мм - $P_0 = 10\%$, $m_c = 1,5$ кг, $m_n = 0,27$ кг) по схеме I

| Размер заготовки | Масса заготовки $G \cdot 10^{-3}$ кг | Скорость нагружения V_c , м/с | Энергия деформирования | | | Конечная высота брикета h , мм | Осадка h_0 , мм | Степень деформации h/h_0 |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------|
| | | | прилагаемая W_c , Дж | полезная W_n , Дж | удельная $W_n \cdot 10^3$ Дж/кг | | | |
| $\varnothing 10 \times 10$ | 5,8 | 19,7 | 221,48 | 188,16 | 32,34 | 1,80 | 7,20 | 0,80 |
| | 5,8 | 90,0 | 4517,8 | 3831,8 | 660,52 | 1,61 | 7,39 | 0,82 |
| | 5,8 | 65,0 | 2410,8 | 2048,2 | 352,8 | 1,66 | 7,34 | 0,81 |
| | 5,8 | 67,3 | 2587,2 | 2195,2 | 379,26 | 1,55 | 7,45 | 0,83 |
| $\varnothing 15 \times 15$ | 18,5 | 83,5 | 3978,8 | 3381 | 182,28 | 4,50 | 9,50 | 0,68 |
| | 18,7 | 49,3 | 1381,8 | 1176 | 62,72 | 4,81 | 9,19 | 0,66 |
| | 18,5 | 87,5 | 4370,8 | 3714,2 | 202,86 | 4,48 | 9,52 | 0,68 |
| $\varnothing 20 \times 20$ | 45,8 | 19,5 | 275,38 | 232,26 | 4,9 | 14,00 | 4,40 | 0,28 |
| | 45,9 | 20,7 | 321,4 | 272,44 | 5,88 | 10,45 | 8,95 | 0,46 |

Примечание: m_c - масса снаряда; m_n - масса пуансона.

Приложение энергии (W_c) больше критической (соответствующей точки перегиба) не деформирует металл, т.е. практически бесполезно. Анализ результатов показывает, что при малых степенях деформации наблюдается упруго-пластическая осадка почти без изменения исходной пористости, затем происходит уплотнение, а при максимальных степенях обеспечивается достижение беспористой структуры.

Как видно из рис 1 и 2, кривые прилагаемой энергии деформирования $W_c = f(\Delta h/h_0, \Delta h)$ имеют перегибы. Точки перегибов связаны с процессом уплотнения материала до 100% и его раздачей до полного заполнения полости матрицы.

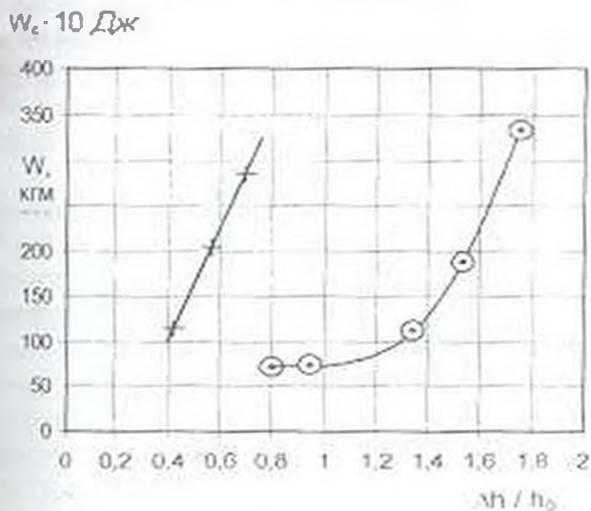


Рис. 1. Зависимость осадки от кинетической энергии деформирования (W_c) спеченных железных образцов ($P_0 = 20\%$). Размеры образцов: 1 - $\varnothing 80 \times 80$ мм, 2 - $\varnothing 30 \times 30$ мм. Деформирование проведено по схеме II [2].

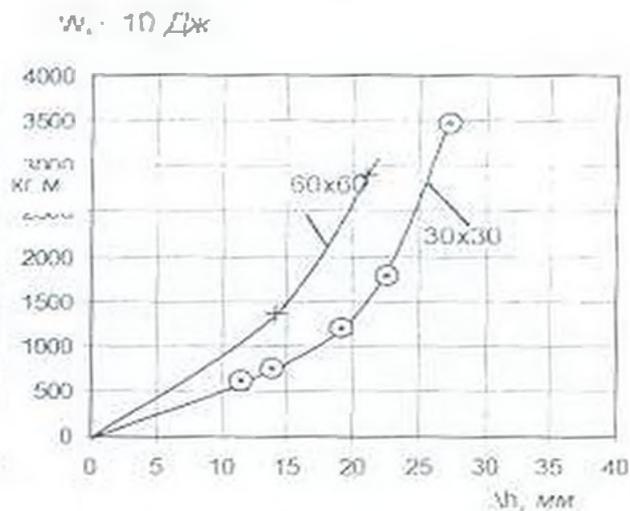


Рис. 2. Зависимость степени деформации от кинетической энергии деформирования (W_c) спеченных железных образцов ($P_0 = 20\%$). Размеры образцов: 1 - $\varnothing 60 \times 60$ мм.

При свободной осадке, в зависимости от пластичности материала, имеется определенный предел "допустимости" радиального деформирования, т.е. оптимальный предел максимального обжатия. Вследствие перехода через этот предел (при большой разнице между диаметрами заготовки и матрицы) на ряде образцов возникают наклонные и долевые трещины. Наклонные трещины ориентированы под углом $\approx 45^\circ$ к плоскости действия сил. Развитие трещин от периферии к центру образцов также происходит под углом $\approx 45^\circ$ к направлению радиуса (деформирование производилось по схеме II). Такое разрушение можно отнести к вязкому сдвигу от максимальных касательных напряжений, вызванных дополнительными растягивающими напряжениями.

Из анализа картин разрушения можно сделать вывод, что при осадке пористого тела высокими скоростями нагружения существуют два вида разрушения - сдвиг и отрыв. Разрушение сдвигом происходит на

ранних стадиях развития трещин; последняя имеет ориентацию под углом $\approx 45^\circ$ к направлениям внешней силы или радиуса. Из рис. 3 можно заключить, что пластичность материала (т.е. способность деформироваться без разрушения) при прочих равных условиях в значительной степени зависит от скорости нагружения. Несмотря на более высокую степень деформации $\Delta h/h_0 = 0,88$, образец менее разрушен. По-видимому, уменьшение V_c с 152 до 103 м/с и увеличение массы соударяемого тела (снаряда) с 1,55 до 6,05 кг привели к более благоприятному напряженно-деформированному состоянию обрабатываемого тела, т.е. повышению его технологической пластичности. Повышению пластичности способствует также уменьшение исходной пористости заготовки. Так, при равной скорости нагружения трещины одинаковой интенсивности образовались в первом случае $\Pi = 20\%$ при $\Delta h/h_0 = 0,88$; во втором случае $\Pi = 38\%$ при $\Delta h/h_0 = 0,67$.

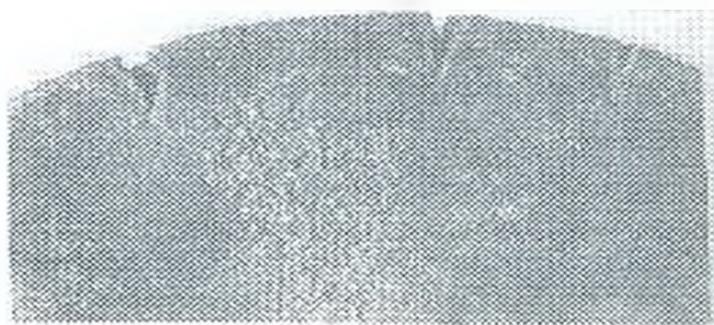


Рис 3. Макрошлиф поперечного сечения железного образца (x5). Размеры до осадки: $\varnothing 30 \times 30$ мм, $\Pi_0 = 20\%$, $S = 0,13$ кг, $V_c = 103$ м/с, $m_c = 6,05$ кг, $W_c = 32144$ Дж, $\Delta h = 26,4$ мм, $\Delta h/h_0 = 0,88$, схема II



Рис 4. Радиально - кольцевые трещины, возникшие в нижнем торце осажженной железной заготовки. $\varnothing 45 \times 45$ мм, $\Pi_0 = 30\%$, $V_c = 90$ м/с, $m_c = 6,06$ кг, $W_c = 24500$ Дж, схема II

На рис. 4 показан нижний торец брикета, полученного после деформации пористой заготовки (материал ПЖ2М, размеры $\varnothing 45 \times 45$ мм, $\Pi = 30\%$, $V_c = 90$ м/с, $m_c = 6,05$ кг, $W_c = 24500$ Дж, $\Delta h/h_0 = 0,45$; по схеме II). Наблюдается множество радиально-кольцевых трещин, возникших вследствие объемного расширения отдельных зон пористого тела при быстром приложении и мгновенном снятии нагрузки. По виду это напоминает картину при деформации за пределом упругости, когда вдоль траекторий максимального сдвига возникают локализованные разрушения, которые образуют линии Чернова-Людерса, расширяющиеся затем до точки, где наступает разделение материала. В нашем случае разделение выражено заметным вспучиванием по концентричным окружностям плоскости нижнего торца, где локализовано большое количество радиально - кольцевых трещин.

Образование различных видов разрушения, появление трещин и форма боковой поверхности при высокоскоростной деформации пористых заготовок указывают на сложный характер упруго-пластического течения материала пористой заготовки при осадке. По-видимому, накладывает свой отпечаток волновая природа распростране-

ния пластической деформации. При соударении деформирующего снаряда с заготовкой порождается мгновенно распространяющаяся упругая волна и следующая за ней волна пластической деформации. После распространения ее по всему объему заготовки от контакта с пуансоном отражается волна разгрузки, которая в виде растягивающего импульса передается в заготовку. Возникновение дополнительных волн приводит к неоднородности напряженно - деформированного состояния.

При кратковременной передаче энергии большой концентрации пористой массе "мгновенно" уплотняется верхняя часть брикета, тогда как волна разгрузки, отражаясь от нижней ее границы, создает дополнительные растягивающие напряжения в нижней части заготовки, имеющей более низкую плотность. Следует считаться также с тепловым эффектом при высоких скоростях, когда тепловыделение происходит по отдельным плоскостям скольжения, причем в микрообъемах достигаются высокие температуры, вплоть до температуры плавления.

При таких условиях течения следует ожидать высоких относительных скоростей перемещения отдельных объемов пористой массы. При достижении некоторой критической относительной скорости появляются трещины и другие дефекты. Однако относительная скорость деформации зависит не только от скорости удара, но и от распределения деформации и скорости перемещения разных зон в деформированном объеме. На последние влияют начальные характеристики пористой заготовки (P_0 , h/d ; термообработка), а также различные схемы деформации, позволяющие повысить скорости деформирующего инструмента. Вариацией этими параметрами можно найти оптимальные характеристики высокоскоростного деформирования пористых заготовок.

В табл. 2 приведены результаты скоростного деформирования спеченных железных заготовок различного диаметра, но постоянной высоты $h_0 = 23,9$ мм и пористости $P_0 = 10...12\%$ в матрице диаметром 25 мм по схеме I при скоростях нагружения 84,5 м/с и 106...110 м/с. При постоянной скорости (энергии) деформирования окончательная плотность брикетов практически одинакова ($7,6 \cdot 10^3$ кг/м³) и не зависит от степени аксиальной и радиальной деформации. С увеличением степени радиальной деформации макротвердость (измерение по верхнему торцу) и микротвердость (измерение вдоль диаметра по плоскости среза) по диаметру различны (табл.2), абсолютные их значения возрастают с увеличением скорости нагружения. Исследование показало, что увеличение скорости нагружения и степени (аксиальной и радиальной) деформации повышает предел прочности при изгибе. Это является результатом сильного упрочения (наклепа) ввиду большой припаиваемой удельной энергии $W_{уд}$, Дж/кг), а также лучшего образования контактов между зернами, которые вытягиваются вдоль плоскости максимальных деформаций (течение материала), образуя волокнистую структуру.

Таблица 2

Данные скоростного уплотнения и деформирования спеченных железных заготовок различного диаметра, но постоянной высоты $h_0 = 23,9$ мм и пористости $\Pi_0 = 10,12\%$ в матрице диаметром 25 мм по схеме 1 при постоянных $m_c = 1,14$; $m_r = 0,23$ кг

| Диаметр заготовки d_0 , мм | Вес заготовки $G \cdot 10^{-3}$ кг | Скорость загрузки V_c , м/с | Удельная энергия $W_{уд} \cdot 10^3$ Дж/кг | Окончательные размеры брикетов | |
|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|-----------------|
| | | | | Диаметр d , мм | Высота h , мм |
| 24,6 | 80,0 | 106,0 | 66,64 | 25,25 | 21,00 |
| 21,0 | 54,7 | 106,0 | 97,51 | 25,25 | 14,40 |
| 17,9 | 40,4 | 106,0 | 132,3 | 25,25 | 10,60 |
| 15,0 | 28,1 | 110,0 | 203,84 | 25,25 | 7,40 |
| 12,0 | 18,1 | 110,0 | 317,52 | 25,25 | 4,75 |
| 24,6 | 80,0 | 84,5 | 42,336 | 25,25 | 21,00 |
| 17,9 | 40,8 | 84,5 | 92,61 | 25,25 | 10,80 |
| 12,0 | 18,3 | 84,5 | 184,24 | 26,25 | 4,85 |

Продолжение табл. 2

| Плотность $\rho \cdot 10^3$ кг/м ³ | Степень деформации | | Микротвердость, 10^7 Н/м ² | $\sigma_{max} \cdot 10^7$ Н/м ² |
|---|---------------------------|---------------------------|---|--|
| | аксиальная $\Delta h/h_0$ | радиальная $\Delta d/d_0$ | | |
| 7,65 | 0,127 | 0,027 | 130-164 | 13,3 |
| 7,60 | 0,397 | 0,168 | - | - |
| 7,60 | 0,556 | 0,281 | - | 13,4 |
| 7,60 | 0,690 | 0,407 | - | 13,8 |
| 7,60 | 0,800 | 0,525 | 164-190 | 14,3 |
| 7,65 | 0,127 | 0,027 | 114-130 | 13,1 |
| 7,52 | 0,548 | 0,291 | - | - |
| 7,54 | 0,797 | 0,525 | 140-170 | 13,8 |

Таким образом, на основании вышеизложенного можно прийти к следующим выводам:

- 1) появление трещин происходит в результате существования двух видов разрушения - сдвига и отрыва;
- 2) с увеличением скорости приложения нагрузки сопротивляемость пористого тела пластической деформации возрастает;
- 3) пределы допустимых максимальных степеней деформации следующие: аксиальные - до 0,7 и радиальные - до 0,6;
- 4) определены этапы высокоскоростного деформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порошковая металлургия, материалы, технология, свойства, области применения. Справочник – Киев. Науксва думка, 1985 - 624 с
2. Исследование влияния высоких скоростей приложения нагрузок на деформируемость пористых тел в условиях закрытой матрицы / О.В. Роман, Д.О.Бабаян и др. // Порошковая металлургия. Труды ЕрПИ – Ереван, 1971. – Т. 35, вып. 1 - С. 50-54.
3. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование в металллокерамике. М., 1972. - 70 с.

Ղ.Տ. ԲԱԲԱՅԱՆ, Է.Գ. ՀԱՄԲԱՐՉՈՒՄՅԱՆ

ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆԵՐԻ ՕՐԻՆԱԶԱՓՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԲԱՐՉՐ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՄԲ ԲԵՌՆԱԿՈՐՄԱՆ ԴԵՊՆԵՄ

Որոշված է դեֆորմացիայի աստիճանի փոփոխության բնութագրիկ կախված ներդրման կներգիայից: Ուսումնասիրված է առածգական պլաստիկ դեֆորմացիայի դինամիկան: Որակապես և քանակապես որոշված են ծակաակեն մարմնի քայքայման հարրությունները: Ապացուցված է, որ նկարդված բնի արագության մեծացմանը զուգրերագ աճում է մարմնի պլաստիկ դեֆորմացիայի դիմադրողականությունը: Ծակաակեն մարմնի բարձր արագությամբ բեռնավորման ընթացքում որոշված են առանցքի ուղղությամբ և շառավղի ուղղությամբ դեֆորմացման աստիճանի օպտիմալ սահմանները:

D.H BABAYAN, E.G HAMBARTSUMYAN

POROUS BODY DEFORMATION REGULARITY IN HIGH-SPEED LOADING

The deformation degree variation character caused by the applied energy is established. The elastic-plastic deformation dynamics is studied. The quantitative and qualitative estimation of the porous body destruction flatness is specified. It is proved that by increasing load application speed the resistivity to porous body of the plastic deformation rises. Optimum limits of axial and radial degrees of porous body deformation by high-speed loading are determined.