

может быть ключевой причиной отсутствия долговечных ремонтных материалов на основе цемента для бетонных конструкций. Понимание усталостного разрушения при ремонте поверхности бетона и методов снижения концентрации межфазных напряжений при повторяющихся нагрузках являются ключевыми вопросами в будущих исследованиях для разработки долговечного ремонта бетонных сооружений.

### Литература

1. Shih Horng, Y. Properties of Cementitious Repair Materials for Concrete Pavement / Y. Shih Horng [et al.] // Advances in Materials Science and Engineering, 2022. – Vol. 22. – P. 17.
2. Hojati, M. Creep of alkali-activated cement mixtures / M. Hojati, F. Rajabipour, A. Radlińska // Elsevier BV: Case Studies in Construction Materials, 2023. – Vol. 16. – P. 13.
3. Song, X. Cement-Based Repair Materials and the Interface with Concrete Substrates: Characterization, Evaluation and Improvement / X. Song [et al.] // MDPI: Polymers, 2022. – Vol. 14. – P. 25.

УДК 621.1.016:536.2

### **Теоретические исследования параметров процесса скоростного выдавливания заготовок изделий медицинского назначения**

Качанов И. В., Ленкевич С. А.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Получение качественных заготовок медицинских изделий с минимальной материалоемкостью, наименьшей себестоимостью и снижением трудоемкости при последующей механической обработке является одной из приоритетных задач, исходя из этого с учетом экономической целесообразности, заготовки медицинских изделий рационально изготавливать методами обработки металлов давлением с последующей механической обработкой.*

Деформирование, применяемых в медицине, коррозионностойких сталей, титана и его сплавов в холодном состоянии зачастую связано с большими трудностями, главные из которых необходимость применения мощного оборудования из-за большого сопротивления сплавов деформированию. значительное пружинение как следствие низкого модуля и высокой прочности. Эти трудности в значительной степени устраняются при применении импульсной обработки давлением. Мощность ударного воздействия

практически неограниченна, а пластичность сплавов в некоторых случаях может быть повышена как за счет резкого увеличения самой скорости деформации, так и за счет преднамеренного создания благоприятной схемы напряженного состояния, которую трудно создать при статическом деформировании из-за резкого увеличения усилий деформирования.

Особенно значительные преимущества для титановых сплавов имеет применение скоростного горячего объемного деформирования на высокоскоростных установках или молотах.

Серьезные недостатки традиционной горячей деформации – окисление поверхности титановых сплавов и образование хрупких газонасыщенных поверхностных слоев окалины, ухудшающих качество поверхности.

Перечисленные недостатки в значительной мере устраняются при скоростной деформации. Кроме хорошего заполнения ручьев штампа, малых штамповочных уклонов и радиусов штамповок при высокоскоростной горячей штамповке, возможно заполнение штампа за один ход пуансона при точном соблюдении заданной температуры деформации.

Кроме того, при скоростном горячем деформировании проще использование различных видов улучшающих термомеханических обработок, закалка штамповок сразу после деформации [1].

Заполняемость полостей штамповой оснастки определяется комплексным действием ряда факторов, важнейшими из которых являются тепловой режим деформирования, контактное трение и силы инерции.

При скоростном деформировании ( $v = 15$  м/с и более) начинает сказываться влияние теплового эффекта [2].

Процесс в этом случае считается адиабатическим и протекает с интенсивным выделением тепла в зонах наибольших деформаций. Следовательно, неравномерное распределение деформаций при высокоскоростном деформировании сопровождается неравномерным распределением температуры по объему.

Приращение температуры в результате пластической деформации в среднем по объему определяется соотношением [3]

$$\Delta t = \frac{\psi A_k}{427 c \gamma V},$$

где  $\psi$  – КПД удара;  $A_k$  – работа деформации, кДж;  $c$  – удельная теплоемкость, кал/(г °С);  $\gamma$  – удельный вес, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем заготовки, подвергаемый формоизменению, м<sup>3</sup>.

Ряд исследований [3] показал, что при скоростях деформирования  $v = 5-10$  м/с тепловые потери и температурный эффект балансируются, а

деформирование при более высоких скоростях приводит к увеличению теплосодержания поковки.

Таким образом, формообразование тонких элементов поковки, (которые зачастую присущи заготовкам медицинских имплантатов) на скоростном ударном оборудовании протекает в тепловых условиях, способствующих поддержанию в деформируемом материале высокой пластичности.

В последнее время проведены работы, позволяющие прямо или косвенно судить о коэффициенте трения при высокоскоростном деформировании. На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов бочкообразности, рассчитанных относительно верхнего торца осажённых образцов, от скорости деформирования [4]. Коэффициент бочкообразности  $(D - d)/D$  находится в прямой зависимости от силы трения, поэтому кривые на рис. 1 косвенно отражают изменение коэффициента трения, уменьшающегося с ростом скорости деформирования.

Из анализа кривых на рис. 1 видно, что с увеличением скорости деформирования силы трения меньше, чем при прессовании с обычными скоростями, причем начиная от скоростей  $v = 80$  м/с и выше контактное трение пренебрежимо мало.

Кроме того, наличие смазки при скоростной штамповке обеспечивает жидко-граничное трение, когда между трущимися поверхностями находится жидкая пленка полностью не выдавливающаяся и не теряющая свойств жидкости в процессе деформирования.

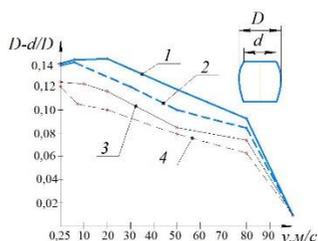


Рис. 1. Зависимость коэффициента бочкообразности, относительно верхнего торца образца при осадке заготовок из стали Р 18 от скорости деформирования [3; 4]:  
1 – 900 °C; 2 – 1000 °C; 3 – 1100 °C; 4 – 1180 °C при относительной степени деформации  $\epsilon = 65$  %

Для аналитического описания распределения сил трения, исследования проведенные А. П. Грудевым [5] показывают, что введение допущения о постоянстве сил трения не вносит большой погрешности.

При штамповке со скоростями деформирования от 20 м/с и более инерция металла вызывает дополнительные напряжения, значения которых могут быть соразмерны удельными усилиями со стороны инструмента. При этом ускорения и замедления частиц, вызванные изменением скорости от нуля до максимума и снова до нуля, становятся очень большими.

Процесс скоростного выдавливания протекает в две стадии: запрессовка и выдавливание. Первая стадия как по времени, так и по энергозатратам менее значительна, чем вторая. Рассмотрим стационарную стадию.

Баланс сил может быть представлен уравнением

$$P = P_1 - P' + P'' - P''' , \quad (1)$$

где  $P$  – усилие со стороны инструмента;  $P_1$  – «статическая» составляющая усилия;  $P'$ ,  $P''$ ,  $P'''$  – инерционные усилия, развиваемые массами заготовки: движущейся в контейнере, составляющей очаг деформации (и ускоряемой в нем прямо пропорционально коэффициенту вытяжки), и прогрессованной (изделие); это – динамические составляющие усилия.

Почленно разделив (1) на площадь контейнера  $F_0$  и оценив полученные слагаемые, можно показать, что «статическая» составляющая сопротивления деформированию  $p_1 = P_1/F_0$  значительно превышает составляющие от сил  $P'$  и  $P'''$ , поэтому последними можно пренебречь.

Заслуживает внимания составляющая силы инерции металла, который с ускорением движется в очаге деформации.

Учитывая только осевые компоненты и предполагая, что очаг деформации равен объему заходного конуса матрицы и линии тока металла направлены к точке пересечения образующих, матричной воронки, составляющая сил инерции будет

$$\frac{P''}{F_0} = \frac{\rho v^2}{2} \lambda^2 ,$$

где  $\rho$  – плотность металла, скорость деформирования, м/с;  $\lambda$  – коэффициент вытяжки (при выдавливании).

Значительно более точную модель очага деформации дает метод линий скольжения.

На основе кинематически возможных полей скоростей, состоящих из жестких блоков, получено уточненное выражение для инерционного слагаемого удельного усилия [6]

$$\frac{P''}{F_0} = (1 + \lambda) \rho v^2 \bar{p}_2 = \alpha \rho v^2, \quad (2)$$

где  $\bar{p}_2$  – безразмерный коэффициент, зависящий от вытяжки и угла входа матрицы.

Кривые для определения параметра  $\alpha$ , зависящего от коэффициента вытяжки и угла входа матрицы, построены по литературным данным [3] (рис. 2).

Выражение (2) получено для прессования с постоянной скоростью. В этом случае ускорение любой точки в очаге деформации определяется только конвективной компонентой, локальная равна нулю. Для процессов ударного выдавливания, протекающих с переменными (уменьшающимися) скоростями, оба упомянутых ускорения не равны нулю. Задача для таких процессов пока не решена. Однако очевидно, что в случае уменьшающейся скорости конвективное и локальное ускорения противоположны по знаку. Поэтому полное дополнительное напряжение будет меньше величины, получаемой по (2), а, следовательно, последнее можно рассматривать как верхнюю оценку сил инерции металла, ускоряемого в очаге деформации.

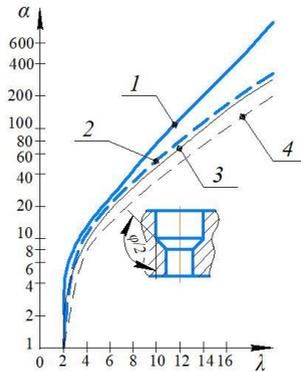


Рис. 2 – Зависимость множителя  $\alpha$ , определяющего динамическую составляющую удельного усилия при осесимметричном выдавливании, от коэффициента вытяжки [3]:

1 –  $\phi = 180^\circ$ ; 2 –  $\phi = 120^\circ$ ; 3 –  $\phi = 90^\circ$ ; 4 –  $\phi = 60^\circ$

Таким образом, удельное усилие, действующее при ударном выдавливании с уменьшающейся скоростью, является суммой двух слагаемых: «статической» составляющей и составляющей сил инерции на преодоление «реакции» очага деформации:

$$p = p_1 + \alpha r v^2. \quad (3)$$

Коэффициент вытяжки при ударном скоростном выдавливании оказывает значительное влияние на силы инерции. При низкой начальной скорости и большом коэффициенте вытяжки могут возникнуть гораздо большие силы инерции, чем при высокой начальной скорости и малом коэффициенте вытяжки. Поэтому начальная скорость истечения металла из очага матрицы при анализе действия сил инерции является более показательной величиной, чем начальная скорость выдавливания [7; 8].

Характер разрушения стержневой заготовки под действием инерционных сил позволяет оценить пластичность деформируемого металла в условиях одноосного скоростного растяжения. Оценка пластичности соотносится величиной относительного поперечного сужения, рассчитываемого для круглых стержней, как и при испытании образцов на разрыв.

Явление разрушения, а также возникновение дефектов (уплотнений, расслоений и др.) металлов, деформируемых с высокими скоростями, возникает ввиду неравномерности и локализации деформации. Это явление зависит от совместного действия температурно – скоростных условий деформирования, механических и физических свойств деформируемого металла, конфигурации и размеров поковки, механической схемы деформации и т. д.

Рост растягивающих напряжений сопровождается повышением температуры в месте локализованной деформации. Также следует отметить, что повышение температуры может содействовать увеличению пластичности при растяжении силами инерции, если суммарная температура, зависящая от теплоты предварительного нагрева заготовки, теплового эффекта деформации и тепловых потерь, не вызовет перегрева деформируемого металла. Напротив, перегрев, вызванный интенсивной деформацией, приводит к разрушению сплава еще в очаге деформации [8].

### Литература

1. Мажарова, Г. Е. Обработка титановых сплавов давлением. / Г. Е. Мажарова, А. З. Комановский, Б. Б. Чечулин, С. Ф. Важенин. – М.: Металлургия, 1977. – 96 с.

2. Шарий, В. Н. Получение стержневых изделий скоростным горячим выдавливанием с плакированием торцевой части: дисс... канд. техн. наук: 05.16.05 / В. Н. Шарий. – Минск, 2009. – 163 с.

3. Согришин, Ю. П. Штамповка на высокоскоростных молотах / Ю. П. Согришин, Л. Г. Гришин, В. М. Воробьев. – М.: Машиностроение, 1978. – 164 с.

4. Мещанчук, П. А. К вопросу определения истинной степени деформации и характера контактного трения при осадке стали Р18 в условиях высоких скоростей нагружения. / П. А. Мещанчук, Ю. П. Согришин // Высокоскоростная объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 85–92.

5. Грудев, А. П. Теория прессования металлов / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1975. – 356 с.

6. Непершин, Р. И. Расчет усилия при высокоскоростном прессовании / Р. И. Непершин, В. И. Даценко, В. А. Матяж // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972, – № 2. – С. 1–4.

7. Томленов, А. Д. Определение усилий процессов плоского и осесимметричного высокоскоростного прессования / А. Д. Томленов. – М.: Наука, 1970. – 340 с.

8. Костышев, В. А. Высокоскоростная штамповка [Электронный ресурс]: электрон, учеб. пособие / В. А. Костышев; Минобрнауки России, Самар, гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон, текстовые и граф. дан. (1,91 Мбайт). – Самара, 2011. – 65 с.

УДК 621.1.016:536.2

**Экспериментальные исследования 3D-моделей составов судов, эксплуатируемых в режимах толкания и буксировки**

Качанов И. В., Ключников В. А., Ленкевич С. А.,  
Шаталов И. М., Щербакова М. К., Власов В. В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В процессе работы проводились экспериментальные исследования 3D-моделей барже-буксирных составов с выдачей рекомендаций по их эффективной и рациональной эксплуатации на внутренних водных путях Республики Беларусь.*

Гидромеханика в настоящее время не позволяет теоретически предсказать с требуемой для практики точностью геометрию обводов корпуса