

УДК 621.791.753.0

**А. И. Хабибуллин, Г. Ф. Ловшенко, канд. техн. наук, доц.,
Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф.**

РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУЗИИ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ

Рассмотрены особенности процесса экструзии заготовок, изготовленных из дисперсно-упрочненной гранулированной композиции на основе меди. С помощью метода координатной сетки показан характер истечения материала при экструзии, рассмотрена зависимость неоднородности получаемого материала от технологических факторов. Предложена методика определения усилий, необходимых для экструзии дисперсно-упрочненной меди.

Основные технологические этапы изготовления изделий из дисперсно-упрочненных материалов на основе меди включают в себя реакционное механическое легирование; холодное прессование полученных дисперсно-упрочненных гранулированных композиций; термообработку гранулированных композиций; экструзию прутков требуемого профиля; формообразование заготовок методами горячей объемной штамповки и, наконец, получение изделий с помощью механообработки. Для достижения высоких значений всего комплекса физико-механических свойств порошковые композиции подвергаются горячей экструзии с высокими степенями деформации.

Процесс экструзии (прессования) широко применяется для производства прутков, различных профилей и труб, поэтому ему посвящено большое количество исследований. Основы физики процесса прессования были разработаны Н. С. Курнаковым и С. Ф. Жемчужным еще в 1913 г.; фундаментальные экспериментальные исследования проводил С. И. Губкин [1]; отработкой технологии прессования занимался П. С. Истомина. Влияние дополнительных напряжений на процесс выдавливания исследовал И. М. Павлов [2], он же сумел объяснить явление образования характерных трещин («елки»).

Ряд работ теории прессования посвятили И. Л. Перлин [3], А. В. Ребельский [4], Л. А. Шофман [5], В. Джонсон, Х. Кудо [6], Ш. Кобаяши, Э. Томсен [7].

В процессе экструзии дисперсно-упрочненной меди нагретый брикет с материалом помещается в контейнер и выдавливается через отверстие в матрице. Профиль получаемого изделия соответствует форме и размерам отверстия матрицы.

При схеме процесса с прямым истечением (рис. 1, а) порошковая композиция 2 выдавливается из контейнера 1 через отверстие матрицы 4 при воздействии на нее пуансона 3. В процессе экструзии пуансон перемещается относительно стенок контейнера в направлении истечения порошковой композиции, причем перемещаться в пространстве может как пуансон, так и контейнер.

При экструзии с обратным истечением (рис. 1, б) матрица 3 перемещается пуансоном 4 относительно стенок контейнера 2, а порошковая композиция относительно стенок контейнера почти не перемещается, за исключением небольшого объема вблизи матрицы. В связи с этим влияние трения на усилие экструзии и на процесс истечения материала композиции значительно меньше, чем при экструзии с прямым истечением.

На рис. 2 представлена экспериментальная кривая зависимости давления в гидравлической системе пресса усилием 2500 кН от пути перемещения пуансона при прямой схеме экструзии дисперсно-упрочненной меди. Диаметр исходной заготовки 66 мм, высота 140 мм, диаметр получаемого прутка 16 мм. В качестве

смазки применялась смесь порошка графита с маслом «Литол-24».

На начальной стадии экструдирования происходит осадка брикета с порошковой композицией, приводящая к сниже-

нию зазора между брикетом и поверхностью канала контейнера, в связи с чем усилие экструзии изменяется от нуля до максимального.

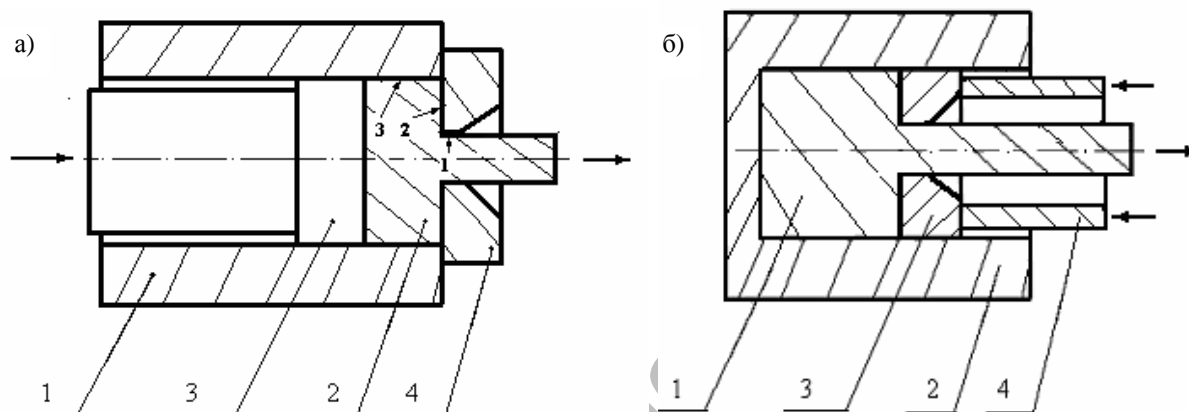


Рис. 1. Схема прямой (а) и обратной (б) экструзии

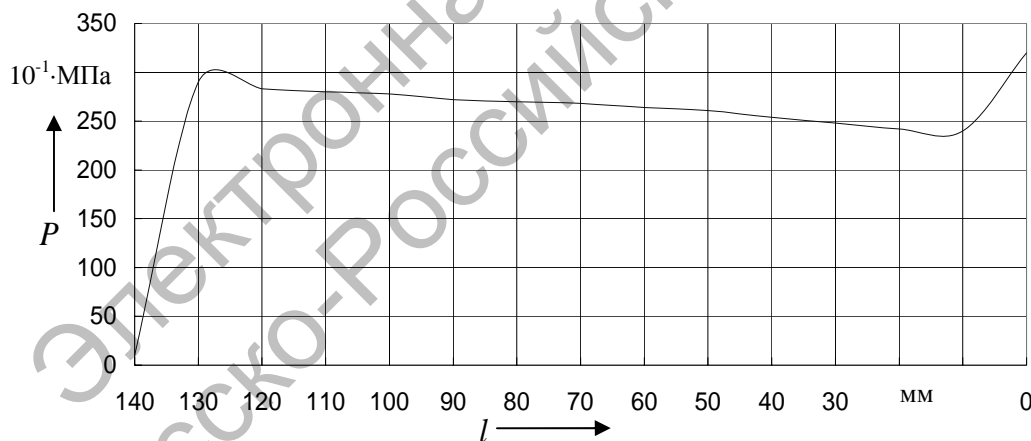


Рис. 2. График зависимости давления от перемещения пуансона

На установившейся стадии процесса усилие снижается в связи с уменьшением площади контактирующих поверхностей брикета и контейнера. На завершающей стадии остаток брикета находится в зоне пластической деформации. При постоянной скорости движения пуансона это приводит к резкому увеличению скорости

скольжения экструдированной композиции в щелевидном пространстве по поверхностям пуансона и матрицы от периферии к центру, что приводит к резкому возрастанию усилия.

Одной из важнейших технологических проблем, возникающих при экструзии жаропрочных композиционных

материалов на основе меди, является проблема низкой стойкости основных деталей технологической оснастки, применяемой для экструзии. Низкая стойкость обусловлена тем, что в процессе экструзии жаропрочного дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе меди контейнеры и матрицы находятся в исключительно тяжелых температурно-силовых условиях. Пределы текучести этого материала составляют 71 МПа при температуре 800 °С и 62 МПа при температуре 850 °С. Кроме того, для предотвращения снижения пластичности композиционного материала технологическую оснастку приходится нагревать с помощью печи до температуры 400...450 °С. В процессе экструзии поверхности матриц и контейнеров, контактирующие с заготовкой, подвергаются значительному локальному нагреву, а в некоторых случаях (например, в случае повышения интенсивности процесса) он происходит до температур, достигающих 600 °С и выше. Чрезмерно быстрый выход из строя оснастки для горячего деформирования может происходить по следующим причинам: если выбрана инструментальная сталь с несоответствующей данным условиям прочностью, термостойкостью или недостаточно высокой вязкостью, а также, если среди основных факторов появляется какой-нибудь ранее не учтенный, например, происходит местный разогрев материала, превышающий расчетные температуры, или усилие экструзии превышает расчетное.

Напряжения, возникающие в материале контейнеров и матриц в процессе экструзии дисперсно-упрочненных материалов на основе меди, зачастую превышают значения длительной прочности для данных температур и даже пределов упругости большинства сталей для горячей штамповки, что проявляется в значительной пластической деформации матриц, контейнеров и пуансонов, резко снижающей срок их службы.

Целью работы являлось определение усилий, значения которых необходимы для выбора прессового оборудования и

расчетов на прочность применяемой для экструзии технологической оснастки.

Для упрощения расчетов рассмотрим наиболее часто употребляемый случай экструзии прутка круглого профиля, когда напряженное состояние в очаге деформации осесимметрично и характеризуется схемой неравномерного всестороннего сжатия, обеспечивающей материалу высокую пластичность.

При схеме процесса с прямым истечением (см. рис. 1) технологическая оснастка с плоской матрицей состоит из трех участков: цилиндрического калибрующего пояска 1; зоны деформации 2; зоны контейнера 3, являющейся цилиндрическим каналом для размещения исходной заготовки. Усилие на пуансоне складывается из совокупности сил сопротивления движению материала на указанных участках.

Рассчитаем удельное усилие p_1 , необходимое для преодоления сопротивления движению материала на первом участке. Материал, проходящий через цилиндрический калибрующий поясок матрицы, пластически не деформируется, так как его формоизменение заканчивается в конце предыдущего участка. Вследствие того, что пластическая деформация всегда сопровождается и упругой деформацией, материал на первом участке находится в упругом напряженном состоянии. Таким образом, максимальная абсолютная величина радиального напряжения σ_{r1} не может превышать значение напряжения текучести σ_{s1} для первого участка [8]. Примем предельное абсолютное значение радиального напряжения: $|\sigma_{r1}| = \sigma_{s1}$.

Усилие для преодоления контактного трения на этом участке можно определить из выражения [8]

$$P_1 = \mu_1 |\sigma_{r1}| \pi d l,$$

где μ_1 – коэффициент контактного трения на первом участке; d – диаметр калибровочного пояска, $d = 0,016$, м; l – длина ка-

либровочного пояса, $l = 0,003$, м; σ_{p1} – предел текучести на участке 1 (при температуре 850°C), $\sigma_{p1} = 62$, МПа.

Удельное усилие p_1 , необходимое для преодоления сопротивления движению материала на первом участке, определим из выражения [8]

$$p_1 = \frac{P_1}{F_1} = \frac{\mu_1 \sigma_{s1} \pi d l}{\frac{\pi d^2}{4}},$$

откуда

$$p_1 = \sigma_{s1} \frac{4\mu_1 l}{d}.$$

При определении коэффициента трения принимались во внимание следующие соображения. Так как на величине сил трения сказывается ряд факторов, которые создают на различных участках различные во времени условия трения и в процессе экструдирования изменяются скорость скольжения, степень деформации и температура, коэффициент трения на контактной поверхности будет зависеть от координат и временного фактора. Учитывая вышесказанное, для расчетов возможно использовать лишь некоторое усредненное значение коэффициента трения [8].

Для определения коэффициента трения применим метод осадки исходного цилиндрического образца коническим бойком. В этом методе используется явление неравномерности деформации вследствие трения. При осадке между параллельными бойками образец приобретает бочкообразную форму тем более выраженную, чем выше значения коэффициента трения. С. И. Губкин предложил метод определения коэффициента трения в зависимости от степени искажения цилиндрической формы. Развитием этого метода является осадка образца коническими бойками [9]. В этом случае на торце цилиндрического образца выполняется коническая выточка с углом конусности α , равным углу образующей конуса на торце бойка (рис. 3). В процессе осадки на конической поверхности исходного образца действуют нормальное усилие N и сила трения T . Трение препятствует перемещению материала от центра к периферии, а нормальное усилие содействует этому процессу. В случае равенства горизонтальных проекций нормального усилия N_x и силы трения T_x образец при осадке должен сохранить цилиндрическую форму: $N \cdot \sin \alpha = T \cdot \cos \alpha = N \cdot f \cdot \cos \alpha$.

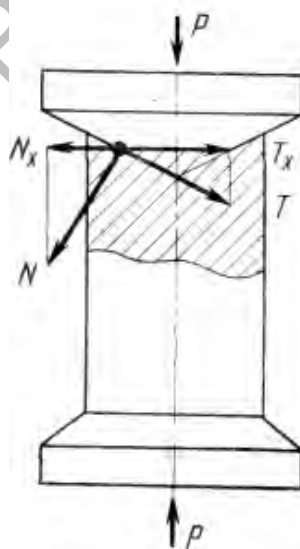


Рис. 3. Схема действия сил при осадке коническими бойками

Подобрав угол α образующей конуса пробным деформированием, после которого образец вследствие осадки сохранит цилиндрическую форму, можно считать тангенс этого угла равным коэффициенту трения при заданных условиях. Для определения коэффициента трения исходные образцы подготавливали следующим образом. В стаканах из медной фольги толщиной 0,15 мм прессовались брикеты с гранулированной композицией. Получаемые брикеты имели диаметр 64 мм и высоту 150 мм, давление прессования составляло 250 МПа. Прессованные брикеты подвергались нагреву в атмосфере водорода до температуры 800 °С и последующей частичной экструзии. Торце пуансона имел форму усеченного конуса с заданным углом, вследствие чего на верхнем торце брикета появлялась выемка соответствующей конфигурации. Пуансон изготавливался из того же материала, что и матрица, с соответствующей шероховатостью поверхности. Брикеты экструдировались, пока их высота не достигала 140 мм. При этом происходило их спекание, после чего они охлаждались вместе с оснасткой для экструзии и извлекались для дальнейшей механической обработки. Во время механической обработки брикеты обтачивались по наружной поверхности на длину 120 мм до диаметра 60 мм. В последующем образец подвергался нагреву с указанным выше режимом и помещению нагретый до 450 °С контейнер для экструзии и осадки до высоты 120 мм. Смазке подвергался только торце пуансона, предварительно нагретый до температуры 450 °С. В качестве смазки применялась смесь порошка графита со смазкой «Литол-24». В результате экспериментов были определены коэффициенты трения дисперсно-упрочненной композиции о стенки матрицы, изготовленной из стали Р6М5 и обладающей твердостью 63...65 HRC для первого и второго участков (см. рис. 1). Рабочая температура на участке 1 достигает 840...860 °С, а на участке 2 – 790...810 °С. Значения коэффициента трения для первого участка составили 0,20, а для второго

участка – 0,18...0,19.

Процесс перемещения материала в зоне деформации 2 зависит от применяемого типа матрицы. Главным параметром, определяющим форму матрицы, является угол конусности α . Обычно его принимают в пределах угла «естественного течения» – 60...65°, обеспечивающего хорошее качество поверхности получаемого изделия. При углах, больших 65°, на участках сопряжения поверхностей контейнера и матрицы образуются «мертвые зоны» с недеформируемым материалом, который в конце экструзии «скалывается» и его приходится удалять в отход (в случае плоской матрицы в отход удаляется до 18 % материала). Несмотря на повышенный расход материала, увеличение необходимых для экструзии дисперсно-упрочненной меди усилий и снижение качества поверхности, плоская матрица дает возможность удалять изделие без разборки технологической оснастки, что оправдывает ее применение из технологических соображений.

И. Л. Перлин вывел общую формулу расчета удельного усилия в зоне деформации [3]:

$$p_2 = \left(\frac{\tau_k}{\sin \alpha} + \frac{2\sigma_{s2}}{1 + \cos \alpha} \right) \ln \frac{F}{f},$$

где α – угол конусности матрицы, град; σ_{s2} – напряжение текучести для второго участка (при температуре 800 °С), $\sigma_{s2} = 71$, МПа; τ_k – элементарная сила трения (напряжение, численно равное касательному напряжению на контактной поверхности), МПа; F – площадь канала контейнера (которую считаем равной площади пуансона), м²; f – площадь канала матрицы, м².

В случае плоской матрицы ($\alpha = 90^\circ$),

$$p_2 = (\tau_k + 2\sigma_{s2}) \ln \frac{F}{f}.$$

Для использования этой формулы необходимо дать значение τ_k . Так как

осевое напряжение не может быть меньше напряжения текучести для второго участка, то это дает основание принять $\tau_k = \mu_{s2}\sigma_{s2}$ [8]. Подставив значение τ_k , получим

$$p_2 = \sigma_{s2} (\mu_{s2} + 2) \ln \frac{F}{f} = \sigma_{s2} \mu_{s2} \ln \frac{F}{f} + 2\sigma_{s2} \ln \frac{F}{f} = p_{2mp} + p_{2оэф},$$

где μ_{s2} – фактор трения на втором участке (коэффициент трения по напряжению текучести в отличие от кулоновского коэффициента трения), $\mu_{s2} = 0,18$; p_{2mp} – удельное усилие, необходимое для преодоления сопротивления трению материала о поверхность матрицы на втором участке; $p_{2оэф}$ – удельное усилие, необходимое для преодоления сопротивления деформации материала на втором участке, с учетом дополнительных сдвигов [8].

Определим удельное усилие p_3 , необходимое для преодоления сопротивления движению материала на третьем участке. Процесс перемещения материала в контейнере отличается повышенной сложностью. Обычно экструдирование характеризуется значительной неравномерностью свойств по сечению и по длине получаемого прутка в результате неравномерности деформации. Степень неравномерности деформаций, а следовательно, и свойств изделия зависит от следующих основных факторов: разности температур контейнера, матрицы, пуансона и порошковой композиции; степени и скорости деформации; типа матрицы; механических свойств экструдруемой композиции; сил трения на поверхностях контакта инструмента и порошковой композиции; схемы экструзии; величины зазора между пуансоном и контейнером и пр.

Характер истечения при экструзии дисперсно-упрочненной меди определялся нами методом координатной сетки, изготовленной из низкоуглеродистой стали, установленной в диаметральной плоскости разрезанного по оси образца, и мето-

дом экструзии брикетов, составленных из дисков порошковой композиции, разделенных тонкими дисками из технического железа. Нами было отмечено, что наибольшее влияние на характер истечения имеет состав применяемых смазочных материалов.

Опыты с исходными заготовками из разноцветного пластилина, а также оловянными, с размещенными в них медными координатными сетками, показали, что если пластические свойства незначительно отличаются по всему объему заготовки и коэффициент контактного трения относительно невелик, то на участке контейнера координатная сетка почти не искажена (рис. 4, а). Это указывает на то, что в нем практически не возникает зона пластической деформации.

Если контактное трение увеличивается или же имеется неоднородность пластических свойств материала заготовки, то в зоне контейнера наблюдается искажение координатной сетки (рис. 4, б) из-за более интенсивного истечения внутренних слоев, что говорит о выраженной пластической деформации.

При бедной смазке или ее отсутствии отмечается отчетливое формирование пластической деформации по всему объему третьей зоны (рис. 4, в). К этому же эффекту приводит и образование значительной неоднородности пластических свойств материала в случае значительного охлаждения наружных слоев заготовки за счет отвода теплоты стенками контейнера. В результате охлажденные наружные слои могут перемещаться навстречу пуансону и питать центральную зону у его торца [8].

Этот вид очага деформации характеризуется большой неоднородностью по величине зерен и наличием значительных остаточных напряжений.

При экструзии дисперсно-упрочненной меди в зоне контейнера преимущественно отмечается первый вид очага деформации, что обеспечивается использованием смазок оптимального

состава. Таким образом, можно считать, что материал в указанной зоне перемещается как единое целое в состоянии всестороннего упругого сжатия.

Усилие на преодоление сил трения в зоне контейнера снижается по линейной зависимости по мере уменьшения высоты исходной заготовки L . Однако при опти-

мально подобранной смазке это изменение усилия мало. Из рис. 2 видно, что при снижении высоты заготовки на 50 % усилие трения уменьшается на 6...8 %. При использовании смазки на основе стекла усилие трения в аналогичных условиях снижается на 3...5 %.

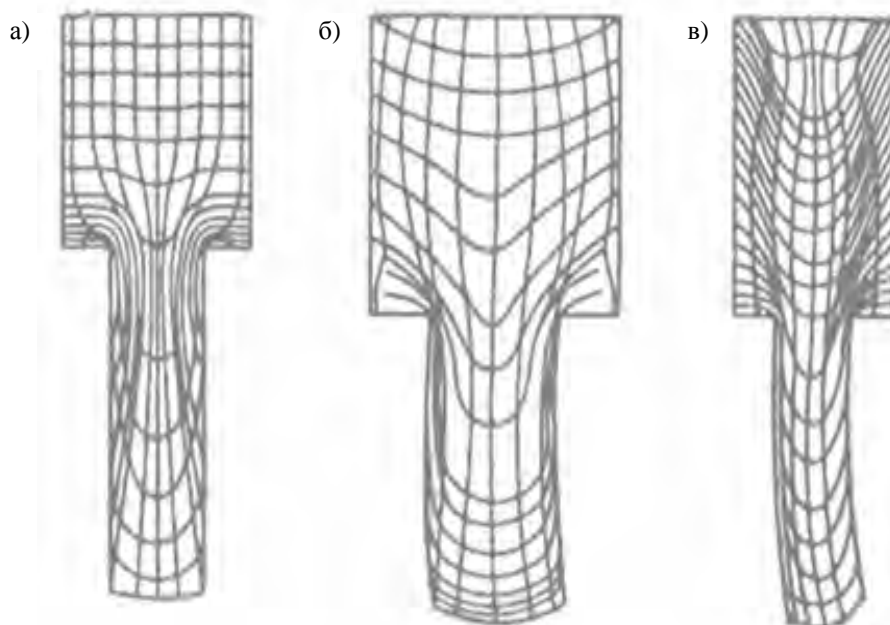


Рис. 4. Схема искажения координатных сеток

В [10] экспериментально доказыва-ется, что элементарные силы контактного трения в контейнере, как правило, не превышают $0,5\sigma_{s3}$. Эти факты позволяют принять напряжение трения τ_k неизменным и равным с небольшим преувеличением $0,5\sigma_{s3}$. При этом упрощении усилие трения на третьем участке будет равняться [8]:

$$P_{тр} = 0,5 \sigma_{s3} \pi D L,$$

где D – диаметр канала контейнера, $D = 0,066$ м; L – высота осаженного брикета (исходной заготовки), $L = 0,130$ м; σ_{s3} – напряжение текучести для третьего участка, $\sigma_{s3} = 71$ МПа.

Разделив это выражение на площадь

пуансона, получим удельное усилие p_3 , необходимое для преодоления сопротивления движению материала на третьем участке:

$$p_3 = \sigma_{s3} \frac{2L}{D}.$$

Таким образом, расчетная формула для определения удельного усилия деформирования при экструзии будет выглядеть следующим образом:

$$p = \sigma_{s1} \frac{4\mu_1 l}{d} + \sigma_{s2} \mu_{s2} \ln \frac{F}{f} + 2 \sigma_{s2} \ln \frac{F}{f} + \sigma_{s3} \frac{2L}{D}.$$

Для технологической оснастки с диаметром канала контейнера 66 мм, применяемой для экструзии прутка диаметром 16 мм из исходной заготовки диаметром 64 мм и высотой 140 мм, нагретой до температуры 800 °С, удельное усилие деформирования будет равно:

$$p = 62 \cdot \frac{4 \cdot 0,2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 10^{-3}} + 71 \cdot 0,18 \cdot \ln \frac{66^2}{16^2} + 2 \cdot 71 \cdot \ln \frac{66^2}{16^2} + 71 \cdot \frac{2 \cdot 130 \cdot 10^{-3}}{66 \cdot 10^{-3}} = 727 \text{ МПа.}$$

Расчетное усилие на пуансоне диаметром 66 мм составляет:

$$P = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p = \frac{3,14 \cdot (66 \cdot 10^{-3})^2}{4} \times 727 = 2485947 \text{ Па.}$$

Расчетное усилие превышает действительное, составляющее 2300 КПа, на 8 %, что с учетом принятых допущений показывает высокую сходимость результатов.

Заключение

Предлагаемый метод расчета усилий, необходимых для преодоления сопротивления движению материала на различных участках технологической оснастки, применяемой для экструзии, показывает высокую степень сходимости с небольшим превышением действительных значений, что позволяет принять его за основу для выбора прессового оборудования и расчетов на прочность деталей технологической оснастки, находящихся в исключительно тяжелых температурно-силовых условиях.

В результате проведения экспериментов и расчетов на прочность нами было установлено, что напряжения, возникающие в материале контейнеров, матриц и пуансонов в процессе экструзии дис-

персно-упрочненных материалов на основе меди, зачастую превышают значения длительной прочности для данных температур и даже пределов упругости большинства сталей для горячей штамповки, что проявляется в их значительной пластической деформации. В связи с этим возникла необходимость использования для изготовления наиболее нагруженных деталей технологической оснастки, пуансонов и матриц, быстрорежущих сталей. Применение быстрорежущих сталей в деталях технологической оснастки для экструзии позволило наладить крупносерийное производство прутков из жаропрочной дисперсно-упрочненной меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т. / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1960. – Т. 1. – 376 с.
2. Павлов, И. М. О физической природе тензорных представлений в теории пластичности / И. М. Павлов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 6. – С. 100–104.
3. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Рейтберг. – М. : Металлургия, 1975. – 447 с.
4. Ребельский, А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки / А. В. Ребельский. – М. : Машиностроение, 1965. – 248 с.
5. Шофман, Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л. А. Шофман. – М. : Машиностроение, 1964. – 375 с.
6. Джонсон, В. Механика процесса выдавливания металлов / В. Джонсон, Х. Кудо. – М. : Металлургия, 1965. – 174 с.
7. Томсен, Э. Механика пластической деформации при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
8. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 424 с.
9. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М. : Металлургия, 1978. – 360 с.
10. Прозоров, Л. В. Прессование стали и тугоплавких сплавов / Л. В. Прозоров. – М. : Машиностроение, 1969. – 244 с.

A. I. Khabibullin, G. F. Lovshenko, F. G. Lovshenko
Calculation of force parameters of extrusion
of dispersed and hardened copper

Peculiarities of extrusion process of blanks made of dispersed and hardened granulated composition based on copper are considered in the article. With the help of coordinate grid method the character of material out-flow at extrusion is shown. Dependence of inhomogeneity of the produces material on technological materials is considered. Methods of force determination, necessary for extrusion of dispersed and hardened copper are given.

Электронная библиотека
Белорусско-Российского университета