



Л. И. Алиева /к. т. н./

Донбасская государственная
машиностроительная академия

Оценка деформированного состояния деталей в процессе холодного выдавливания

Методом верхней оценки установлены характер деформированного состояния детали в процессах поперечного и продольного выдавливания. Показана возможность расчета накопленной степени деформации на основе разрывных полей скоростей с использованием составляющих в выражениях для расчета приведенного давления деформирования. Дана оценка влиянию кинематики выдавливания на деформированное состояние деталей. Предложены способы выдавливания для снижения неравномерности деформаций и устранения возможных дефектов при формообразовании деталей. (Ил. 8. Библиогр.: 20 назв.).

Ключевые слова: выдавливание; деформированное состояние; верхняя оценка; степень деформации; разрушение деталей.

The character of workpiece deformation state in radial-lateral and forward-backward extrusion by the upper bound method is considered. The calculating cumulative degree of deformation based on discontinuous velocity field with using the expression component for calculating absolute pressure of deformation is showed. The influence of extrusion kinematics in workpiece deformation state is determined. The extrusion variants for reducing the non-uniformity of strain and elimination of possible defects in workpiece shapes are defined.

Key words: extrusion; deformation state; upper bound method; degree of deformation; workpiece fracture.

Введение

Выдавливание является перспективным методом получения осесимметричных полых и сплошных деталей с фланцами и утолщениями. Наряду с традиционными способами продольного (прямого и обратного) выдавливания все большее применение находят и новые способы поперечного (радиального и бокового), а также комбинированного поперечно-продольного выдавливания, характеризуемого истечением металла заготовки в поперечном направлении и заполнением радиальной (или канальной) полости разъемной матрицы [1–3].

При холодном выдавливании задача сводится к обеспечению равномерности деформации, значительной проработке структуры, измельчению зерна и изотропного (по возможности) упрочнения заготовки [3–6].

Процессам формообразования методами холодной объемной штамповки полых и сплошных деталей присущи характерные отклонения формы в виде утяжин, складок и зажимов металла, обусловленные неравномерностью течения металла [3; 4; 7–11]. У фланцев и отростков, которые получают поперечным выдавливанием, имеются характерные формы (грибовидность, клиновидность и др.), обусловленные особенностями выдавливания металла в поперечном направлении [4; 10; 11].

Вопросам формирования структуры деформированного металла и, соответственно, экс-

плуатационных свойств изделий, полученных путем обработки давлением, в современном машиностроении уделяется повышенное внимание. Для управления видом деформаций и результатом обработки используется значительный арсенал приемов силового и кинематического воздействия на обрабатываемую заготовку [7–11].

Одним из способов устранения дефектов выдавливаемых деталей является использование возможностей управляемого выдавливания, основанного на реализации кинематических вариантов выдавливания [4, 10]. Поэтому поиск способов, обеспечивающих получение выдавливанием качественных деталей и изучение их технологических возможностей, является актуальной задачей.

Неравномерность деформаций может вызвать нежелательное исчерпание ресурса пластичности и разрушение заготовки в процессе деформирования. Оценка степени деформации с учетом реального пути деформирования, пройденного материалом, позволяет точно определить предельную степень деформирования и степень расхода ресурса пластичности материала в опасных зонах заготовки. Как известно, существует предельное значение степени использованного запаса пластичности, превышение которого приводит к резкому ухудшению механических свойств материала даже при использовании улучшающей термической об-

работки. Задача состоит также в оценке остаточной пластичности полученной детали, что необходимо для выяснения возможности выполнения последующей операции пластического деформирования, а также получении изделий с необходимыми физико-механическими свойствами [4; 5]. Таким образом, для процессов холодного выдавливания наряду с анализом энергосилового режима и лимитирующих процесс удельных нагрузок на инструмент, актуальна и оценка деформированного состояния, оказывающего определяющее влияние на качество формообразования штампуемой детали.

По энергетическому методу верхней оценки величину накопленной степени деформации сдвига γ_{cp} определяют по линиям тока на годографе скоростей [12–15]. При этом полученные по степени γ_{cp} значения интенсивности конечных деформаций $e_c = \gamma_{cp} / \sqrt{3}$ не совпадают со средней (идеальной или логарифмической) степенью деформации e_u , рассчитанной по соотношению площадей сечений исходной заготовки и детали [3]. И. П. Ренне с соавторами полагают справедливым равенство накопленной деформации сдвига приведенному давлению деформирования \bar{p} [14]. Имеются также противоречивые сведения по сравнению γ_{cp} и e_c со степенью деформации e_m , найденной по методу Р. Хилла [12; 13]: $e_m = \bar{p}$.

Целью работы является разработка методики оперативного анализа деформированного состояния заготовки и технологических приемов (способов), направленных на снижение или устранение дефектов деталей при выдавливании.

Анализ закономерностей формообразования фланцев

Для управления формообразованием деталей с фланцами и утолщениями, получаемых поперечным выдавливанием, используются различные приемы силового и кинематического воздействия на деформируемую заготовку.

Особенностью технологии поперечного радиального выдавливания является возможность активного регулирования деформационных и силовых параметров процесса посредством изменения кинематики движения формообразующего инструмента. На рис. 1 приведены некоторые способы (кинематические варианты) радиального выдавливания [3; 4; 15]. Простейшие кинематические варианты радиального выдавливания (рис. 1, схема 1) осуществляются с односторонней подачей металла в рабочую полость неподвижной матрицы. Выдавливание с совмещенной двухсторонней подачей металла может быть выполнено встречным движением пуансонов или принудительным перемещени-

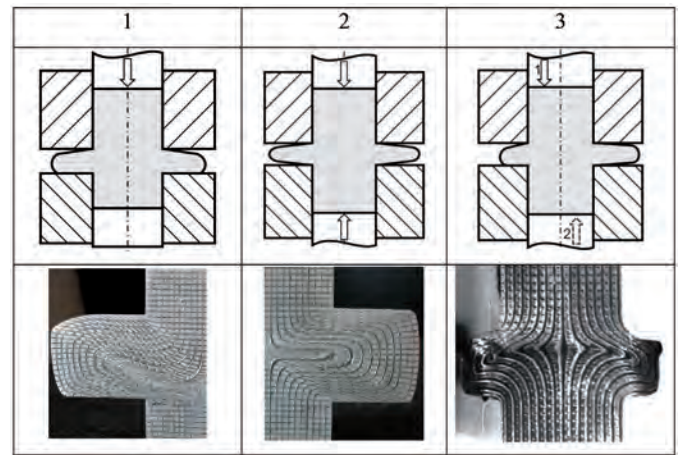


Рис. 1. Образцы, полученные односторонним, двусторонним и последовательным двусторонним выдавливанием

ем матрицы со скоростью, меньшей примерно в 2 раза скорости движения пуансона (схема 2) [4]. По 3-му варианту осуществляется выдавливание с последовательной двухсторонней подачей, обеспечивающей лучшее заполнение радиальной полости.

Разницу в деформированном состоянии деталей, полученных выдавливанием с односторонней подачей металла (одностороннее выдавливание) и двусторонним выдавливанием, можно продемонстрировать на примере искажения делительной сетки, нанесенной на деталь перед поперечным выдавливанием (см. рис. 1). При одностороннем поперечном (как боковом, так и радиальном) выдавливании очаг интенсивной деформации имеет несимметричную форму. Зона максимальной деформации и, соответственно, зона максимального упрочнения смещаются к нижней границе очага деформации, на которой происходит резкий скачок степени деформации металла. При двустороннем выдавливании очаг деформации имеет симметричную форму, а полученные фланцы, соответственно, имеют симметричную клинообразную форму с толщиной у кромки, уменьшающейся по мере увеличения диаметра фланца.

Кинематическая схема подачи металла при поперечном выдавливании оказывает сильное влияние на характер распределения деформаций по высоте очага деформации. При двустороннем выдавливании очаг деформации (ОД) располагается в средней части заготовки и симметричен относительно вертикальной и горизонтальной осей заготовки. Данная схема деформирования более благоприятна с точки зрения качества получаемого изделия и силового режима. При одностороннем выдавливании очаг деформации расположен ниже центральной оси отростков, хотя по высоте ОД и несколько больше, чем при двустороннем выдавлива-

нии. Зона максимальной деформации прилегает к нижней границе ОД. Такая неравномерность распределения деформаций может быть причиной более низких эксплуатационных свойств готового изделия, и ее точная оценка на стадии анализа и проектирования технологии представляет практический интерес. Знание степени формоизменения при выдавливании необходимо также для учета влияния упрочнения холоднодеформируемого металла на силовой режим процесса.

Методика оценки деформированного состояния

Анализ процесса радиально-прямого выдавливания проводился с использованием энергетического метода верхней оценки. Принимаем допущение о плоско-деформированном состоянии и строим из жестких (недеформируемых) кинематических элементов кинематически возможное поле скоростей (КВПС) и годограф скоростей (рис. 2).

Рассмотрим пример плоского поперечного выдавливания в матрице с конической переходной кромкой. На рис. 1 показано разрывное поле скоростей, состоящее из двух модулей плоского течения (бокового I и прямого II выдавливания), включающих, соответственно, элементы 1-6 и 7-10. Там же даны распределение интенсивности деформации сдвига в каждом модуле и их сумма, полученная после поперечного выдавливания.

Для расчета приращения сдвиговой деформации на линиях (поверхностях) разрыва скоростей используют выражение, вытекающее из энергетических принципов [12; 13]:

$$\gamma_{ij} = v_{ij} / v_{ij}^n, \tag{1}$$

где v_{ij} , v_{ij}^n – разрыв касательной составляющей и нормальная к линии разрыва составляющая вектора скорости. Эти величины устанавливают по годографу скоростей.

Накопленную (вдоль линии тока) величину сдвиговой деформации и среднюю интенсивность скорости деформации сдвига γ_{cp} определяют после нахождения сумм γ_{ij} для характерных каналов течения, ширина которых должна быть установлена с помощью построения характерных линий тока на годографе скоростей [14].

Интенсивность конечных деформаций рассчитывается по формуле:

$$e_c = \gamma_{cp} / \sqrt{3}. \tag{2}$$

Расчеты не вызывают затруднения для простых схем, составленных из одного жесткого кинематического элемента, но требуют громоздких построений в случае применения разрывного поля, составленного из 3 и более жестких (чаще треугольных) элементов.

Неравномерность деформации на выходе из зоны 6 (модуля I) (см. рис. 2) обусловлена тем, что металл в центральном канале А пересекает пять границ (1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6), а в канале

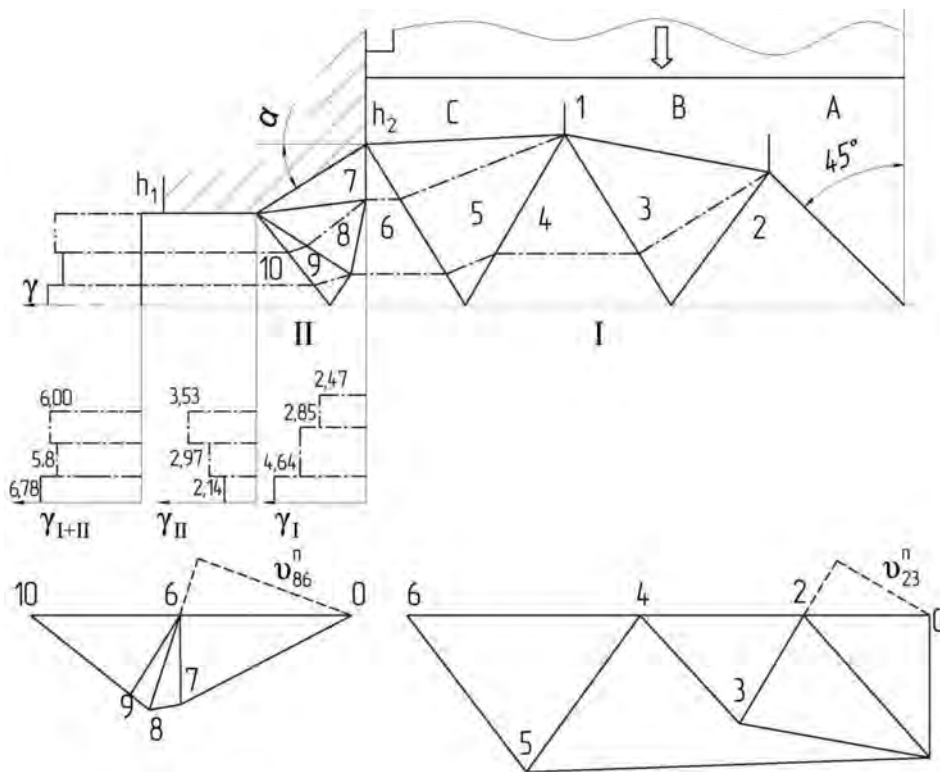


Рис. 2. Разрывное поле, годограф скоростей и распределение деформации по ширине полосы в модулях

С – лишь две границы (1–5 и 5–6). На каждой поверхности разрыва можно вычислить значение приращения сдвиговой деформации γ_{ij} .

Интересно, что для этого можно использовать и зависимости для l_{ij} и V_{ij} , обычно устанавливаемые для расчета приведенного давления методом верхней оценки.

Трудность определения в каждом канале нарастающей от границы к границе и итоговой (накопленной) интенсивности деформации состоит в правильном определении числа пересеченных границ. Для вычисления средней накопленной деформации на последовательно пересекаемых границах и на выходе из очага деформации необходимо также правильно установить ширину (долю) потока, соответствующую данному каналу на граничных линиях и в сечении выдавливаемого отростка. Как правило, для разделения каналов (потоков) необходимо, используя годограф скоростей, построить траектории перемещения частиц металла, начиная от узловых точек, расположенных на входной границе и на выходе из ОД.

Как показали исследования, разделение ширины выдавливаемого отростка и промежуточных граничных линий l_{ij} может быть осуществлено в той же пропорции, в какой узловые точки способны разделить недеформируемую зону 1, примыкающую к входной границе очага деформации. При этом для всех поверхностей среза приращение относительной сдвиговой деформации γ_{ij}^c равно удвоенной составляющей приведенного давления $\Delta\bar{p}_{ij}$, учитывающей этот срез, т. е. $\gamma_{ij}^c = 2\Delta\bar{p}_{ij}$.

Суммируя $\Delta\bar{p}_{ij}$, можно вывести формулу для приведенного давления. Так, для бокового выдавливания в пределах первого модуля:

$$\bar{p} = (R_0/h_2 + h_2/R_0)/2. \tag{3}$$

А расчетное среднее значение интенсивности деформаций:

$$e_c = \gamma_{cp} / \sqrt{3} = 2 / \sqrt{3}. \tag{4}$$

Полученная зависимость (4) показывает, что значения интенсивности деформаций, вычисленные по методике Р. Хилла ($e_m = \bar{p}$) и по линиям тока ($e_m = 1.155\bar{p}$), отличаются коэффициентом $2/\sqrt{3}$.

Что касается расчета накопленной деформации на локальных поверхностях среза ($i-j$), то, помимо суммирования γ_{ij} вдоль линий тока, на каждой границе ширину потока (длину l_{ij}) необходимо разделить на доли, соответствующие каналам течения. Зная относительную ширину канала \bar{b} , можно вычислить величину приращения деформации для каждого автономного канала на данной поверхности среза:

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ij}^c / \bar{b}. \tag{5}$$

При помощи коэффициента ширины канала \bar{b} можно вычислить величину приращения деформации для каждого автономного канала на данной поверхности среза $\gamma_{ij} = \gamma_{ij}^c / \bar{b}$. При этом на общей для различных каналов поверхности среза, например, на границах 5–6 или 9–10, величины $\Delta\bar{p}$ и γ не могут быть отнесены только к тому или иному каналу, поэтому для этих каналов относительная величина γ на общей границе берется без деления, т. е. $\gamma_{5-6} = \gamma_{5-6}^c$. Эту особенность общей границы не следует упускать из виду и при расчете впоследствии средней накопленной деформации на данной поверхности среза. Так как до этой границы нарастание деформации происходило по автономным каналам, то средняя накопленная деформация при подходе к границе вычисляется с учетом ширины каналов, а при пересечении самой общей границы добавлением и γ_{5-6} .

Последовательность действий для определения интенсивности деформации и средних значений накопленной деформации для усредненного или локального учета упрочнения деформированного металла показана на рис. 3.

Следует отметить, что выражение (1) невозможно применить, когда линия скольжения (обычно огибающая очаг деформации) совпадает с линией тока и нормальная компонента скорости v_{ij}^n равна нулю. В таких случаях можно использовать подход [16], основанный на предположении о равномерном распределении деформации, связанной со сдвигом на линии разрыва, в прилегающей к этой линии зоне (приграничном кинематическом элементе). Для случаев плоской деформации, когда такая огибающая линия скольжения отделяет очаг деформации и крайний кинематический элемент от жесткой зоны, рекомендуется уточненное выражение для дополнительного значения сдвиговой деформации:

$$\Delta\gamma_{ik} = \Delta\gamma_{i0} = \frac{v_{i0} \cdot l_{i0}}{v_{im}^n \cdot l_{im}} = \frac{v_{i0} \cdot l_{i0}}{v_{is}^n \cdot l_{is}} \tag{6}$$

Индексы 0 и k указывают на положение кинематического элемента, содержащего пограничную линию разрыва, параллельную линии тока, индексы m и s относятся к двум другим смежным граням треугольного приграничного элемента.

Для элементов, прилегающих непосредственно к контактными поверхностям с учетом интенсивности касательных напряжений, выражение (6) можно записать так:

$$\Delta\gamma_{ik} = 2\mu \cdot \frac{v_{ik} \cdot l_{ik}}{v_{im}^n \cdot l_{im}} \tag{7}$$

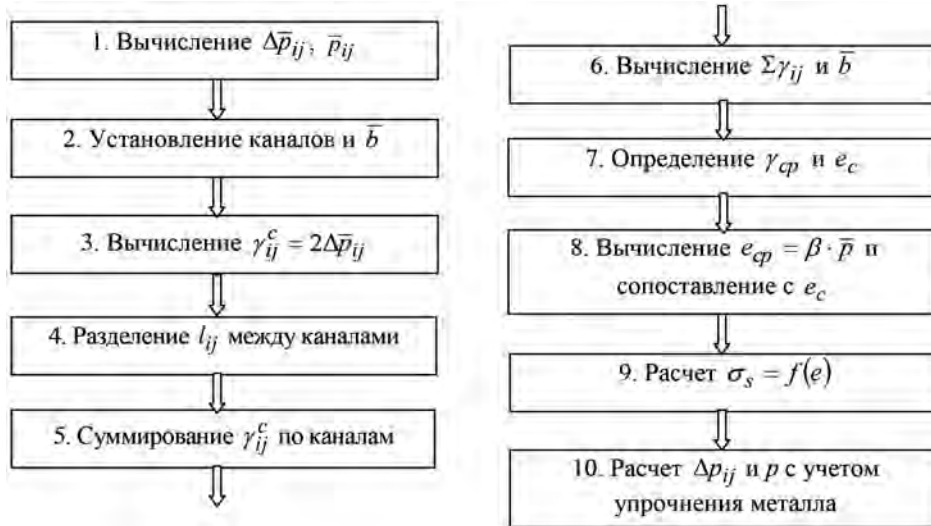


Рис. 3. Алгоритм расчета интенсивности деформации и учета упрочнения

Разрывные поля скоростей независимо от положения кинематических элементов (рис. 4, линии 1–4) показывают, что наибольшей деформации при поперечном выдавливании подвергаются слои металла, прилегающие к центру выдавливаемого отрезка. При выдавливании без конического переходного участка, т. е. непосредственно на выходе из контейнера (модуля I), коэффициент неравномерности деформации $K_n = \gamma_{\max} / \gamma_{\min}$ меняется от 1,7 до 2,3. При этом большие значения соответствуют малым величинам относительной высоты полости R_0 / h_2 ($R_0 / h_2 = 2.0 \dots 4.0$).

После прохождения металлом конического участка (модуля II) и обжатия по высоте (от h_2 до h_1) неравномерность деформации заметно снижается, так как деформация при прохождении участка сопровождается неравномерностью обратного порядка. При обжатии, как при прямом выдавливании, большую интенсивность деформации приобретают периферийные слои. При сложении таких последовательных неравномерностей деформаций получается более равномерная по сечению отрезка проработка металла. Коэффициент неравномерности снижается

до 1.15 и менее. Способ поперечного выдавливания с обжатием выдавливаемого отрезка может быть эффективным средством получения высококачественных металлоизделий.

Возможность применения рассмотренной методики расчета деформаций через составляющие давлений деформирования была проверена и на иных схемах выдавливания. На рис. 5 показана схема прямого выдавливания через коническую матрицу и распределение накопленной деформации по ширине полосы. При этом дано сопоставление эпюр накопленных деформаций (ломаные линии 1 и 4) с экспериментальными данными (предельные кривые 2, 3), полученными для плоского стационарного выдавливания [14]. Сравнимые линии достаточно близки, что подтверждает пригодность метода верхней оценки для вычисления характеристик формоизменения.

Ломаные линии 1 и 4 на (рис. 5б) получены из практически одного и того же поля (рис. 5а), в которое каждый раз вносили небольшое изменение угла наклона l_{1-2} и других граничных линий. Из этого следует, что для оценки характера распределения локальных значений и нерав-

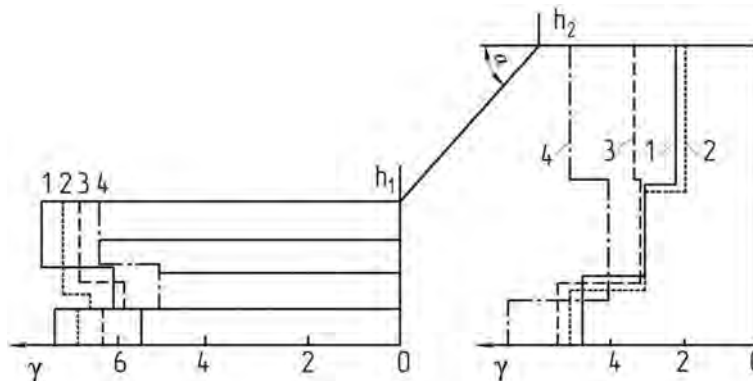


Рис. 4. Снижение неравномерности деформации при боковом выдавливании в конусной матрице

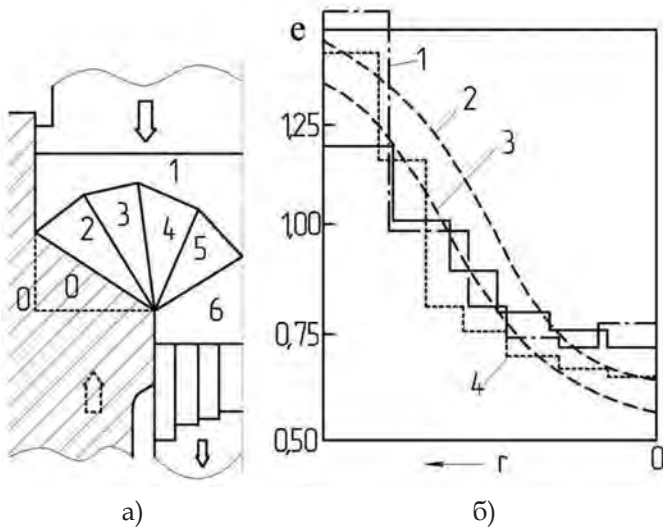


Рис. 5. Разрывное поле скоростей (а), распределение накопленной деформации по ширине полосы (б)

номерности деформаций необходимо использовать КВПС с возможно большим числом жестких элементов и с обязательной минимизацией значений параметров, устанавливающих положение узловых точек в физическом поле скоростей.

Таким образом, для расчета накопленной деформации на основе разрывных полей скоростей могут быть использованы составляющие выражений для приведенного давления без необходимости установления нормальных компонент скоростей.

Подбор схем выдавливания в многопереходном процессе или при комбинированном выдавливании, проведенный с учетом характера распределения деформаций, может быть эффективным методом снижения неравномерности деформации заготовки.

На рис. 6 схематично показан эффект от суммирования накопленных деформаций при последовательном деформировании на операциях безотходной сквозной прошивки втулки и последующего ее прямого выдавливания. Коэффициент неравномерности при этом снижается ощутимо, так как на первой операции прошивки (обратного выдавливания) наибольшую деформацию претерпевают внутренние слои стенки втулки, а на второй операции – наружные слои. Предложен способ изготовления деталей типа втулок комбинированием сквозной прошивки и последующего прямого выдавливания на оправке, по которому полуфабрикат после прошивки перед прямым выдавливанием кантуют на 180°, что сопровождается также снижением утяжин (скосов) на торцах втулок [17].

Как было отмечено, неравномерность деформации со значительным градиентом вызывает опасность исчерпания ресурса пластичности металла вдоль границ очага интенсивной деформации. При двустороннем поперечном выдавливании очаг деформации имеет симметричную форму и меньшую высоту и объем, что может быть в ряде случаев недостатком, так как на переходных нагруженных участках металл может быть недостаточно упрочненным. При боковом выдавливании с односторонней подачей (см. рис. 1, схема 1) отростки трещины вдоль нижней границы ОД появляются как при деформировании высокопластичных алюминиевых сплавов (рис. 7а), так и при выдавливании в полугорячем состоянии (рис. 7в). Эта неравномерность снижает и эксплуатационную надежность выдавленных изделий. Фланцы (на деталях типа оконцевателей изоляторных подвесок из стали 20), полученные радиальным односторонним выдавливанием, при испытаниях от-

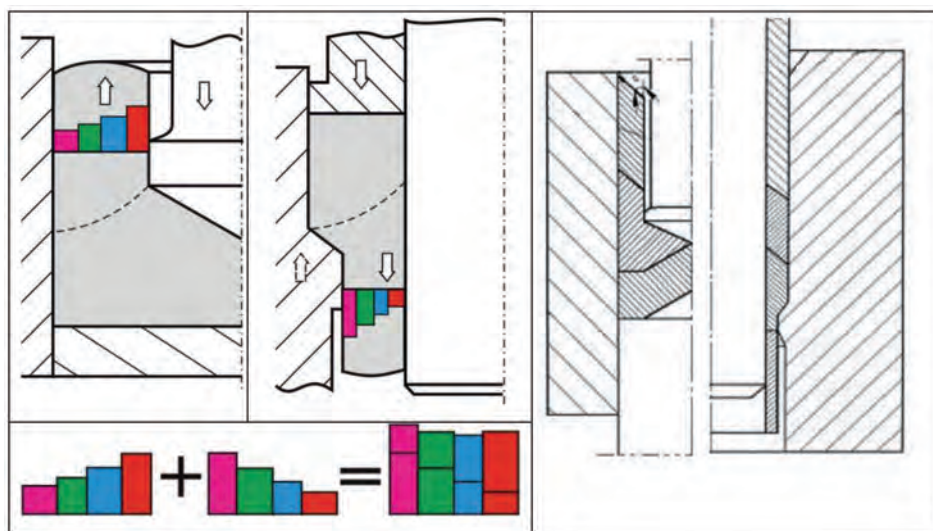


Рис. 6. Сложение неравномерностей деформации при деформировании прошивкой-выдавливанием и способ безотходного получения втулок

делялись по практически гладкой поверхности (рис. 7б).

Для улучшения эксплуатационных свойств нагруженных изделий необходимо управляемое формирование структуры переходных зон (типа галтелей) с целью исключения образования текстуры или истощения ресурса пластичности.

Различные сочетания движений и нагружений пуансонов позволил создать ряд технологических способов, которые регулируют положение зоны максимального упрочнения металла по высоте очага деформации, степень заполнения приемной полости матрицы и форму выдавливаемого фланца.

Устранению и дефектов типа утяжин, и грибовидности фланцев, а также повышению равномерности упрочнения детали способствует комбинированное радиальное выдавливание, вклю-

чающее предварительный набор металла в полость подвижной матрицы и последующую высадку фланца [18]. Способ позволяет управлять траекторией (историей) деформирования и избежать опасной жесткой зоны напряженного состояния. В целом это приводит к повышению в 1,5-2 раза предельных диаметров фланцев, формируемых на стержневых заготовках.

Для деталей с утолщениями и фланцами (и отрезками) установлены положительные возможности схем радиального выдавливания с двусторонней и последовательно двусторонней подачей металла заготовки в полость матрицы. Для устранения опасности разрушения детали на переходном к фланцу участке при одновременном обеспечении достаточной прочности предложено дополнять одностороннее выдавливание двусторонним боковым выдавливанием на заключительной стадии (рис. 8а) [19].

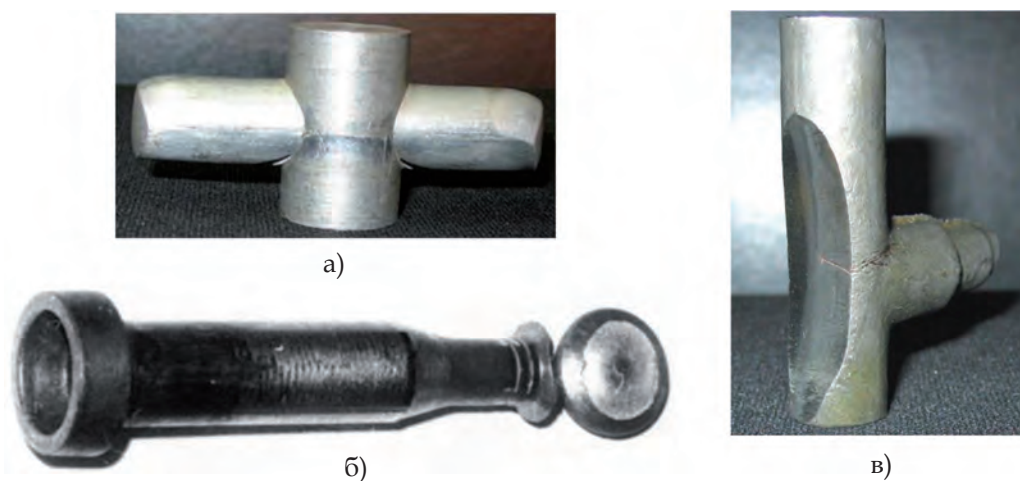


Рис. 7. Разрушение деталей, полученных односторонним поперечным выдавливанием

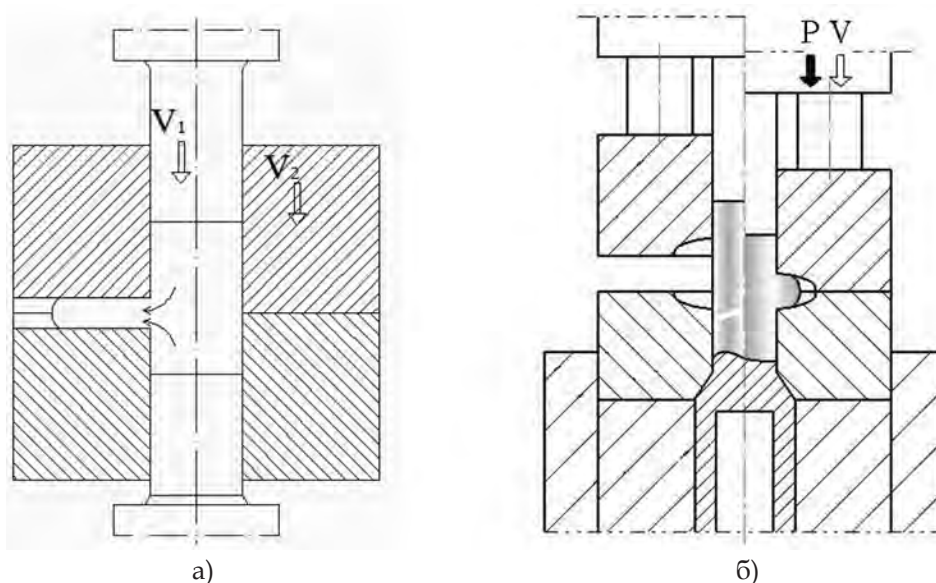


Рис. 8. Способ выдавливания с комбинированной подачей металла (а) и способ высадки-выдавливания (б)

Для этой же цели радиальное выдавливание фланца предваряют высадкой, выполняемой на том же переходе [20]. В тех случаях, когда из-за конструктивных особенностей детали (окончатель) двустороннее выдавливание неосуществимо, эффективна схема комбинированного деформирования, когда на первом этапе выполняют высадку, а затем – одностороннее радиальное выдавливание (рис. 8б).

Выводы

Анализ деформированного состояния методом верхней оценки и методом делительных сеток позволил оценить неравномерность распределения деформаций по сечению заготовок, изготовленных по схемам продольного и поперечного выдавливания. Для расчета накопленной деформации на основе разрывных полей скоростей могут быть использованы составляющие выражений для расчета приведенного давления по методу верхней оценки без необходимости установления нормальных компонент скоростей.

Установлена возможность взаимной компенсации неравномерности деформаций при простых схемах выдавливания при их взаимном сочетании или дополнении. Подбор схем выдавливания в многоступенчатом процессе или при комбинированном выдавливании, проведенный с учетом характера распределения деформаций, может быть эффективным методом снижения неравномерности деформации заготовки.

Предложен ряд технологических способов, которые регулируют положение зоны максимального упрочнения металла по высоте очага деформации, степень заполнения приемной полости матрицы и форму выдавливаемого фланца. К этим способам относятся выдавливание с комбинированной подачей металла в полость подвижной матрицы, которое позволяет управлять течением и расположением зоны с наиболее интенсивным упрочнением на заданной высоте очага деформации; выдавливание, дополненное предварительной или последующей высадкой фланца, и способ изготовления деталей типа втулок комбинированием сквозной прошивки и последующего прямого выдавливания на оправке.

Библиографический список

1. Алиева Л. И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА, 2008. – № 1 (11). – С. 13–19.

2. Cold Forging of Hollow Cylindrical Components Having an Intermediate Flange – Ubet Analysis and Experiment / H. Kudo, B. Avitzur, T. Yoshikai, J. Luksaza a. o. // CIRP Annalen. – 1980. – № 129. – P. 129–133.

3. Холодная объемная штамповка. Справочник / под ред. Г. А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.

4. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 1–4.

5. Огородников В. А. Качество заготовок и прогнозирование ресурса пластичности в современных технологиях обработки давлением / В. А. Огородников, В. И. Ковальчук // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: сб. науч. тр. – Краматорск; Славянск: ДГМА, 2003. – С. 226–233.

6. Алиев И. С. Разработка технологических процессов холодной объемной штамповки, основанных на дифференцированном упрочнении металла / И. С. Алиев // Труды ФПИ. – Фрунзе: ФПИ, 1988. – С. 154–155.

7. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion / I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhibankov // Scientific and technical journal Metallurgical and mining industry. – Dnepropetrovsk, 2011. – Vol. 3. – № 7. – P. 17–22.

8. Техника винтового прессования / Я. Е. Бейгельзимер [и др.] // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2003. – С. 324–330.

9. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие: в 2 т. / А. Л. Воронцов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.

10. Шibaков В. Г. Влияние параметров управляемого поперечного выдавливания на образование дефектов в поковках ступенчатой формы / В. Г. Шibaков, М. Н. Гончаров, С. Н. Гончаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 2005. – № 8. – С. 7–9.

11. Пасько А. Н. Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок: монография / А. Н. Пасько. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – 252 с.

12. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов [и др.]; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

13. Джонсон У. Механика процессов выдавливания металла / У. Джонсон, Х. Кудо. – М.: Металлургия, 1966. – 317 с.

14. Ренне И. П. Неравномерность деформации при плоском пластическом течении. Ч. 1. Стационарное плоское течение / И. П. Ренне, Э. А. Иванова. – Тула : ТПИ, 1979. – 96 с.
15. Алиева Л. И. Характеристика формоизменения металла при выдавливании / Л. И. Алиева, Р. С. Борисов, Е. Л. Скрипниченко // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2003. – С. 340–344.
16. Березовский Б. Н. Определение деформаций и скоростей деформаций при описании пластической области разрывными полями скоростей / Б. Н. Березовский // Обработка металлов давлением. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1980. – С. 177–181.
17. Пат. 74207 Україна, МПК В 21 К 21/00. Спосіб виготовлення деталей типу втулок / І. С. Алієв, Л. І. Алієва, О. М. Бондарєва, А. Р. Гаріфуліна; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u 201202793; заявл. 12.03.2012; опубл. 25.10.2012. Бюл. № 20.
18. Пат. 48902 Україна, МПК В 21 К 21/00. Спосіб виготовлення деталей типу втулки з зовнішнім фланцем / П. Абхарі, І. С. Алієв, Л. І. Алієва, С. В. Мартинов; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № 200910370; заявл. 13.10.2009; опубл. 12.04.2010. Бюл. № 7.
19. Пат. 84078 Україна, МПК В 21 К 21/00. Спосіб виготовлення деталей з бічними відростками / Л. І. Алієва, О. М. Бровкін, І. А. Деревенько, О. А. Жукова, В. В. Цимбаліст; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201304310; заявл. 05.04.13; опубл. 10.10.13. Бюл. № 19.
20. Пат. 51926 Україна, МПК В 21 К 21/00. Спосіб виготовлення деталей типу втулки з фланцем / Л. І. Алієва, С. В. Мартинов, М. С. Москаленко; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № 201000434; заявл. 18.01.2010; опубл. 10.08.2010. Бюл. № 15.

Поступила 01.02.2016

