

10-15 процентов при малых углах отбортовки и 15 - 20 процентов при углах отбортовки больших 45 градусов.

Л и т е р а т у р а

1. Б у р а в л е в Д.Т. Исследование процесса отбортовки импульсным магнитным полем. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1973, 14 с.

2. К а л а н т а р о в П.Л., Ц е й т л и н Л.А. Расчет индуктивностей. М.-Л., Государственное энергетическое издательство, 1966, 608 с.

3. О в ч и н н и к о в Ю.М., Л е б е д е в Г.М., И с а р о в и ч Г.З. и др. О методике определения давления магнитного поля плоских индукторов при импульсной обработке. "Вопросы технологии производства летательных аппаратов. Сборник трудов, вып. 41. КуАИ, 1970, с. 165.

УДК 621.961.2.678.666

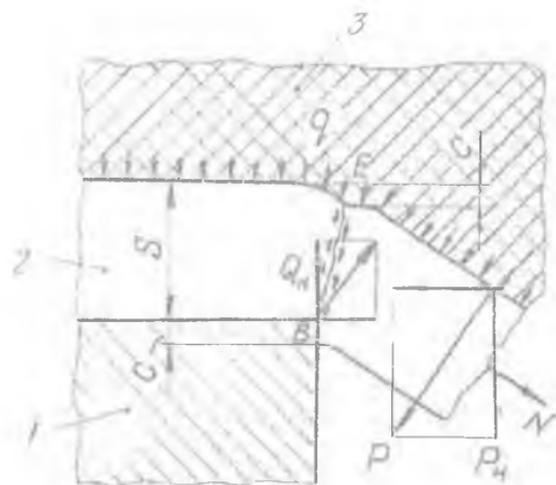
П.Я.Пытьев

О РАСЧЕТЕ ДАВЛЕНИЯ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

В настоящей работе приведены элементарные теоретические инженерные формулы и даны рекомендации по расчету давления со стороны эластичной среды при выполнении разделительных операций.

Схема деформирования заготовки в зоне режущей кромки B жесткого инструмента (пуансона или матрицы) в процессе разделительной штамповки эластичной средой представлена на рис. 1. В этой зоне в штампуемом материале возникает сложное неоднородное силовое поле, учесть все особенности которого при анализе условий деформирования весьма трудно. Поэтому при выводе основных зависимостей, в целях упрощения задачи, используется ряд допущений. В частности, принимается, что деформации и напряжения по сечению BE заготовки в зоне смещения одной части материала относительно другой распределены равномерно. При этом условии, очевидно, будет равномерным и упрочнение материала в процессе штамповки.

В основу вывода расчетных формул положена гипотеза максимальных касательных напряжений, согласно которой предельное состояние



Р и с. 1. Схема деформирования заготовки в зоне режущей кромки жесткого инструмента в процессе разделительной штамповки эластичной средой: 1-жесткий штампуемый инструмент; 2-штампующий материал; 3-эластичная среда

Приложенная к заготовке растягивающая нагрузка N и поперечные силы, стремящиеся сместить одну часть заготовки относительно другой в направлении, перпендикулярном к рабочей плоскости инструмента.

Можно предположить, что в этих условиях происходит чистый сдвиг по поверхности, которая проходит через вершину режущей кромки так, что главные оси составляют с вертикалью угол, примерно равный 45° .

Тогда, согласно гипотезе максимальных касательных напряжений, будем иметь

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}, \quad (1)$$

где σ_s - напряжение текучести.

В соответствии с рис. 1 и с учетом принятых допущений усилие, необходимое для деформирования материала, будет равно:

$$D_{\delta n} = \frac{\sigma_s}{2} \ell (S-C), \quad (2)$$

штампующего материала в зоне режущей кромки жесткого штампуемого инструмента наступает при достижении максимальными касательными напряжениями τ_s предельной величины. Предполагается, что в процессе выполнения разделительных операций эластичной средой схема напряженного состояния материала заготовки близка к линейной, а разрушение материала по контуру жесткого штампуемого инструмента происходит в результате деформаций сдвига.

Указанные деформации

возникают вследствие при-

ложения к заготовке растягивающей нагрузки N и поперечных сил, стремящихся сместить одну часть заготовки относительно другой в направлении, перпендикулярном к рабочей плоскости инструмента.

Можно предположить, что в этих условиях происходит чистый сдвиг по поверхности, которая проходит через вершину режущей кромки так, что главные оси составляют с вертикалью угол, примерно равный 45° .

Тогда, согласно гипотезе максимальных касательных напряжений, будем иметь

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}, \quad (1)$$

где σ_s - напряжение текучести.

В соответствии с рис. 1 и с учетом принятых допущений усилие, необходимое для деформирования материала, будет равно:

$$D_{\delta n} = \frac{\sigma_s}{2} \ell (S-C), \quad (2)$$

- где ℓ - длина контура резки;
 S - первоначальная толщина штампуемого материала;
 C - глубина внедрения режущей кромки жесткого штампуемого инструмента в штампуемый материал.

Если для определения σ_s в зависимости от σ_B принять приближения, аппроксимирующее кривую упрочнения, в виде

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi} \left(\frac{\psi}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}, \quad (3)$$

то выражение (2) примет вид

$$P_{\text{из}} = \frac{\sigma_B}{2(1 - \psi_p)} \ell (S - C) \left(\frac{\psi}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}, \quad (4)$$

- где σ_B - временное сопротивление материала разрыву;
 ψ_p - относительное уменьшение площади поперечного сечения образца в момент начала образования шейки при испытании на разрыв;
 ψ - относительное уменьшение площади поперечного сечения заготовки в зоне режущей кромки при выполнении разделительной операции эластичной средой.

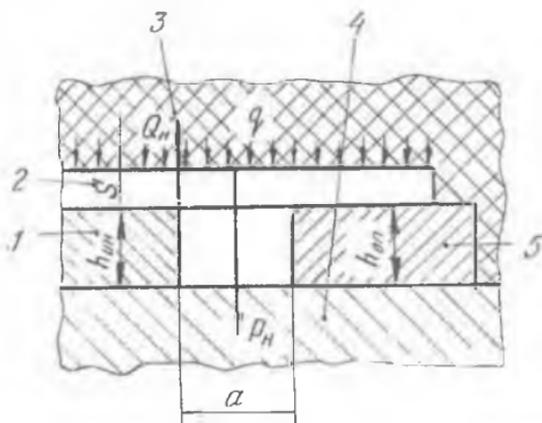
Относительную деформацию ψ можно определить, исходя из схемы деформирования припуска, представленной на рис. 1:

$$\psi = \frac{S\ell - (S - C)\ell}{S\ell} = \frac{C}{S}. \quad (5)$$

Тогда

$$P_{\text{из}} = \frac{\sigma_B}{2(1 - \psi_p)} \ell S (1 - \psi) \left(\frac{\psi}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}. \quad (6)$$

Внешняя нагрузка на штампуемый материал, приводящая его к упруго-пластическому деформированию и последующему разрушению, зависит от конфигурации контура резки, схемы приложения внешних сил и от характера выполняемой разделительной операции. При резке по прямолинейному контуру с дополнительной опорой припуска на обрезку, высота которой $h_{оп}$ равна высоте жесткого штампуемого инструмента $h_{инст}$ (рис. 2), в условиях равномерного распределения давления со стороны эластичной среды, внешняя сила



Р и с. 2. Схема разделительной штамповки эластичной средой с дополнительной опорой припуска на обрезку: 1 - жесткий штампуемый инструмент; 2 - штампуемый материал; 3 - эластичная среда; 4 - подштамповая плита; 5 - дополнительная опора

$$Q_n = \frac{a \ell q}{2}, \quad (7)$$

где α - расстояние между режущей кромкой штампуемого инструмента и дополнительной опорой;
 q - давление на заготовку со стороны эластичной среды.

Исходя из условия равенства внутренних и внешних сил, можно написать:

$$\frac{a \ell q}{2} = \frac{\sigma \delta}{2(1-\psi_p)} \ell S(1-\psi) \left(\frac{\psi}{\psi_p}\right)^{\frac{\psi_p}{1-\psi_p}},$$

откуда

$$q = \frac{S \sigma \delta}{a(1-\psi_p)} (1-\psi) \left(\frac{\psi}{\psi_p}\right)^{\frac{\psi_p}{1-\psi_p}}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что давление q - величина переменная. Оно зависит от ряда факторов и связано математической зависимостью с относительной деформацией ψ . Для расчетной формулы должно быть принято максимальное значение давления q , которое имеет место в момент начала разрушения материала по контуру резки.

Анализ формулы (8) показывает, что при $\psi = 0$ и $\psi = 1$ давление эластичной среды равно нулю. Следовательно, функция $q = f(\psi)$ имеет максимум, для нахождения которого необходимо взять первую производную давления q по деформации ψ и приравнять ее нулю. Нетрудно убедиться, что при этом максимум давления будет соответствовать значению $\psi = \psi_p$.

Подставляя это значение ψ в формулу (8), получим

$$q = \frac{S \sigma \delta}{a}. \quad (9)$$

Аналогично формуле (9) можно вывести формулу для определения давления эластичной среды при вырубке без дополнительной опоры. Схема приложения внешних сил к заготовке и их распределение по припуску на обрезку в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 3. Для прямолинейной резки вертикальную составляющую равнодействующей внешних сил в зоне режущей кромки Q_H можно определить из условия равенства нулю суммы моментов вертикальных составляющих внешних сил относительно точки А:

$$Q_H b_1 - P_H \frac{b_1}{2} = 0,$$

откуда

$$Q_H = \frac{P_H}{2},$$

где P_H - вертикальная составляющая равнодействующей равномерно распределенной нагрузки на свободную наклонную часть припуска ("мостик"), расположенную между режущей кромкой и подштамповой плитой.

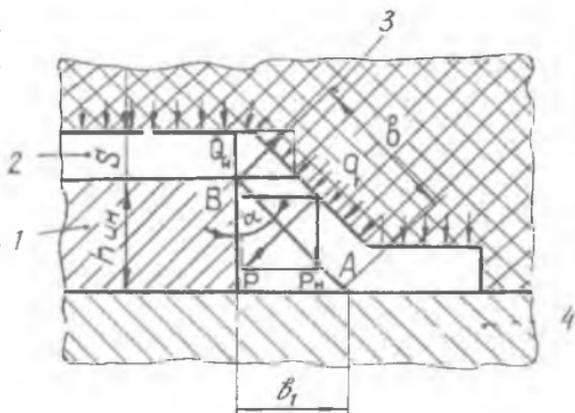
Учитывая, что

$$P_H = h l q \operatorname{tg} \alpha,$$

получим

$$Q_H = \frac{h l q \operatorname{tg} \alpha}{2}, \quad (10)$$

где h - высота жесткого вырубного пуансона;
 α - угол наклона припуска на обрезку к вертикальной



Р и с.3. Схема внешних сил, приложенных к заготовке, при разделительной штамповке эластичной средой без дополнительной опоры: 1- жесткий штампуемый инструмент; 2- штампуемый материал; 3- эластичная среда; 4- подштамповая плита

стенке вырубного пуансона в момент начала разрушения материала по режущей кромке B .

Сопоставляя равенства (8) и (10) с учетом того, что максимум функции $q = f(\psi)$ соответствует $\psi = \psi_p$, получим

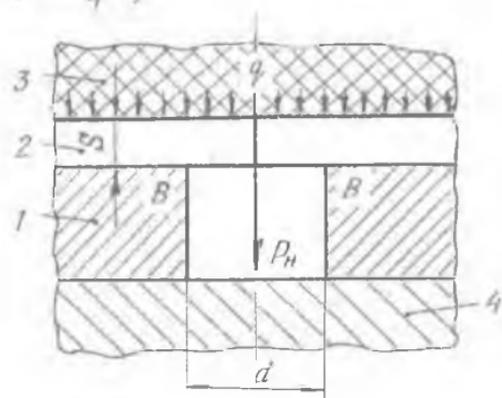
$$q = \frac{2S\sigma_B}{h \operatorname{tg} \alpha} \quad (11)$$

Для круглого отверстия при пробивке выражение (6) для равнодействующей внутренних сил сопротивления материала деформирования будет иметь вид

$$P_{BH} = \frac{\pi d S \sigma_B}{2(1-\psi_p)} (1-\psi) \left(\frac{\psi}{\psi_p}\right)^{\frac{\psi_p}{1-\psi_p}} \quad (12)$$

Равнодействующая внешних сил давления со стороны эластичной среды на заготовку, согласно рис. 4, будет равна:

$$P_H = \frac{\pi d^2}{4} q \quad (13)$$



и давление

$$q = \frac{2S\sigma_B}{(1-\psi_p)d} (1-\psi) \left(\frac{\psi}{\psi_p}\right)^{\frac{\psi_p}{1-\psi_p}} \quad (14)$$

Максимальное значение давления q при $\psi = \psi_p$ будет :

$$q = \frac{2S\sigma_B}{d} \quad (15)$$

Формулы (9), (11) и

Р и с. 4. Схема пробивки отверстия эластичной средой: 1-жесткая матрица; 2-штампуемый материал; 3-эластичная среда; 4-подштамповая плита

(15) выведены с применением многих допущений, которые, не изменяя действительного характера зависимости между параметрами штамповки сказываются на точности произведенных по ним расчетов и поэтому являются приближенными. Для большинства металлов и сплавов, применяемых в производстве летательных аппаратов, они дают несколько заниженные результаты.

Наибольшую погрешность вносит принятое условие о равномерном распределении деформаций и упрочнении материала по сечению заготовки. Компенсировать эту погрешность можно, если в выведенные формулы ввести поправочные коэффициенты, учитывающие степень влияния принятого допущения на конечные результаты расчетов.

Тогда указанные формулы можно переписать в окончательном виде:

для прямолинейной резки с дополнительной опорой

$$q = \frac{K_n S \sigma_B}{a} ; \quad (16)$$

для прямолинейной резки без дополнительной опоры

$$q = \frac{K_n S \sigma_B}{h \tan \alpha} ; \quad (17)$$

для пробивки круглого отверстия

$$q = \frac{2K_n S \sigma_B}{d} ; \quad (18)$$

Экспериментальные исследования показали, что поправочные коэффициенты K_n для различных материалов имеют различную величину, т.е. зависят от физико-механических свойств штампуемых материалов. Однако они не зависят от принятой схемы нагружения заготовки внешними силами в зоне режущей кромки жесткого инструмента и поэтому для различных операций разделительной штамповки, выполняемых на одном и том же материале, имеют одинаковую величину (поэтому для всех формул принят один и тот же коэффициент K_n).

Значения поправочных коэффициентов для некоторых наиболее распространенных металлов и сплавов приведены в таблице.

При пробивке отверстий и вырубке деталей из алюминиевых сплавов, латуни и низкоуглеродистой стали на стальных матрицах и пуансонах с острыми режущими кромками при линейных размерах внутренней полости контейнера, в 2-3 раза превышающих габаритные размеры инструмента, наблюдалось хорошее совпадение давлений, рассчитанных по формулам (16), (17) и (18), с практически полученными максимальными давлениями, которые имели место в момент начала разрушения штампуемого материала по контуру резки.

Анализ этих формул показывает, что все они дают линейную зависимость давления эластичной среды от толщины штампуемого матери-

Т а б л и ц а

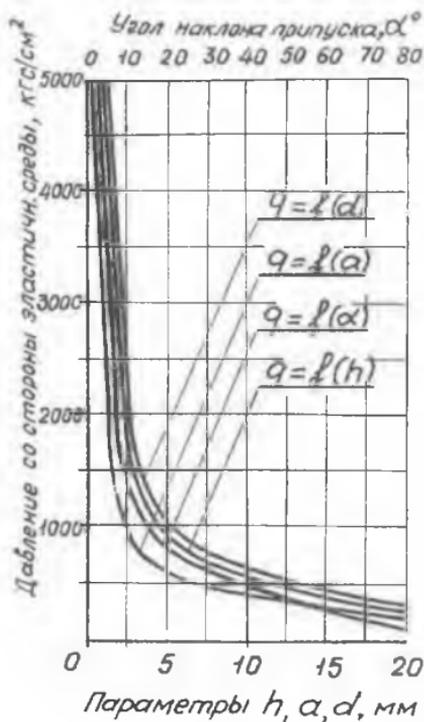
Марка сплава	Предел прочности σ_s , кгс/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Поправочный коэффициент, K_{II}
АО, А	9	25	1,12
АМЦА-М	12,5	23	1,12
АМЦА-П	17	9	1,18
АМГА-М	20	20	1,15
АМГА-П	25	15	1,2
Д16А-М	23	17	1,14
Д16А-Т	45	12	1,25
Л68М	30	40	1,7
Л68 Т	40	15	1,73
Ст10	34	31	1,71
Ст20	42	25	1,72

ала и его временного сопротивления на разрыв. Характерно, что во всех формулах отсутствует зависимость давления q от длины контура резки l . Вместе с тем, формула (16) дает гиперболическую зависимость давления от расстояния a между режущей кромкой пуансона и опорой. На рис.5 изображен график функции $q=f(a)$, построенный по формуле (16) для алюминиевого сплава Д16А-М при $S = 1$ мм.

Уменьшение расстояния a , при прочих равных условиях, приводит к умень-

шению припуска на обрезку. Поэтому с точки зрения снижения расхода материала целесообразно вести штамповку при минимальных значениях a . Но, как видно из графика $q=f(a)$ (рис.5), в этом случае резко возрастает давление q , необходимое для штамповки, а при $a=0$ оно равно бесконечности, следовательно, такая схема штамповки теряет реальный смысл.

Р и с. 5. Зависимость давления эластичной среды от диаметра пробиваемого отверстия d , расстояния между кромкой штампуемого инструмента и дополнительной опорой a , угла наклона припуска α , высоты дополнительной опоры h



На практике максимальное значение q_{max} ограничивается мощностью имеющегося прессового оборудования и размерами контейнера и эластичной средой. Поэтому для заданных конкретных условий существует такое критическое значение α , меньше которого раздольная штамповка становится невозможной. В соответствии с изложенным при технологических расчетах необходимо определять минимально допустимую величину α_{min} .

Формула для расчета α_{min} может быть получена из равенства (16):

$$\alpha_{min} = \frac{K_n S_0 \alpha}{q_{max}} \quad (19)$$

Уравнение (17) показывает гиперболическую зависимость давления q от высоты h жесткого штампуемого инструмента и угла α наклона припуска, заземленного между подштамповой плитой и эластичной средой в начальный период его ориентированного разрушения. Графики зависимости $q = f(h)$ и $q = f(\alpha)$, построенные по формуле (17) для алюминиевого сплава Д16А-М при $S = 1$ мм, показаны на рис. 5.

Для уменьшения отходов штампуемого материала целесообразно уменьшать h и α . Но с их уменьшением давление q резко возрастает, а при $h = 0$ или $\alpha = 0$ оно становится равным бесконечности, что свидетельствует о нереальности процесса штамповки при таком их значении. Следовательно, минимально допустимые значения h и α должны определяться, исходя из возможностей имеющегося оборудования и контейнера с эластичной средой.

Но угол α , кроме того, оказывает влияние на надежность и стабильность процесса разделительной штамповки эластичной средой и на качество кромки среза деталей: с его уменьшением стабильность и надежность процесса, а также качество кромки среза ухудшаются. Следовательно, с точки зрения повышения указанных качественных показателей процесса штамповки угол α необходимо увеличивать.

Таким образом, для улучшения одних параметров процесса штамповки угол наклона заземленного припуска в момент его разрушения требуется увеличивать, а для улучшения других параметров уменьшать. Для отыскания его оптимального значения был проведен анализ и сравнение процессов штамповки с различными углами наклона припуска (углы α изменялись путем соответствующего изменения величины

припуска на обрезку на заготовках из одного и того же материала при неизменном коэффициенте трения между припуском и подштамповой плитой).

Наиболее оптимальным оказался угол $\alpha \approx 35^\circ$, при котором наряду с хорошим качеством деталей, высокой стабильностью и надежностью процесса штамповки, происходит сравнительно небольшое увеличение припуска на обрезку. Дальнейшее увеличение угла α (например, до $45-50^\circ$) не приводит к улучшению качества деталей и стабильности процесса, но заметно повышает расход штампуемого материала. Поэтому при технологических расчетах давление эластичной среды и припуск на обрезку рекомендуется определять при $\alpha = 35^\circ$, что для данного случая наиболее оптимально.

При оптимальном значении α формула (17) принимает более простой вид:

$$q = \frac{1,4 K_H S \sigma_B}{h} \quad (20)$$

Минимально допустимую высоту жесткого пуансона h_{min} можно найти, если известно максимальное давление q_{max} , которое может обеспечить имеющееся прессовое оборудование. Тогда формула для расчета h_{min} будет иметь вид

$$h_{min} = \frac{1,4 K_H S \sigma_B}{q_{max}} \quad (21)$$

Уравнение (18) дает гиперболическую зависимость давления q эластичной среды от диаметра d пробиваемого отверстия. График зависимости $q = f(d)$ для материала Д16А-М при $S = 1$ мм показан на рис. 5. С уменьшением диаметра отверстия давление, необходимое для его пробивки, резко возрастает, особенно при размерах d_q , соизмеримых с толщиной штампуемого материала. Минимальный диаметр отверстия d_{min} ограничивается максимальным давлением q_{max} , которое достигается с помощью имеющегося оборудования, и может быть определен по формуле

$$d_{min} = \frac{2 K_H S \sigma_B}{q_{max}} \quad (22)$$

Приведенные формулы и рекомендации по расчету силовых параметров разделительной штамповки описывают сравнительно небольшой

круг работ из числа тех, которые могут выполняться эластичной средой, и учитывают влияние не всех факторов, действующих в процессе штамповки.

УДК 621.961.2.678.665

П.Я.Пытьев

ОБРАЗОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ
РАБОЧЕГО КОНТУРА ЖЕСТКОГО ИНСТРУМЕНТА
ПРИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКЕ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

Специфические особенности процесса деформирования заготовки при разделительной штамповке эластичной средой требуют несколько иного подхода к определению исполнительных размеров рабочих элементов режущего инструмента, чем при штамповке инструментальными штампами.

Если размеры детали при вырубке в инструментальных штампах определяются размерами проймы металлической матрицы, а размеры пробиваемого отверстия – размерами металлического пуансона, то при штамповке эластичной средой роль матрицы и пуансона на операциях вырубке и пробивки играет эластичная среда, которая не может жестко ограничить размеры детали. Размеры на деталь в этом случае могут быть перенесены только с жесткого штампующего инструмента, имеющего острые режущие кромки, в зоне которых в процессе штамповки локализируются основные деформации, приводящие заготовку к ориентированному разрушению.

Поэтому при вырубке эластичной средой размеры детали определяются размерами жесткого пуансона, а пробиваемого отверстия – размерами проймы жесткой матрицы. Исходя из этих соображений, очевидно, и должны рассчитываться исполнительные размеры рабочего контура жесткого штампующего инструмента.

Существенную роль в этих расчетах играют возникающие в процессе штамповки технологические отклонения размеров детали или отверстия от соответствующих размеров пуансона или матрицы. Экспериментальные исследования показывают, что на операциях вырубке