

Рис. 4. Скорость выделения водорода из влажного порошка сплава АК6

слоя. В результате протекания электрохимических процессов потенциал поверхности порошка все более смещается в область отрицательных значений, а гелеобразные структуры заряжаются положительно. Протекающие диффузионные процессы, сопровождающиеся восстановлением ионов водорода и их рекомбинацией, приводят к выделению водорода из влажного порошка с примерно одинаковой скоростью.

По мере нарастания концентрации ионов алюминия и pH, приближающегося к значениям от 4.5 до 5.0, в приграничных слоях жидкости образуется оксид по реакции $Al^{3+} + 2H_2O \rightleftharpoons AlOON + 3H^+$.

Этот процесс приводит к резкой интенсификации выделения водорода, снижению потенциала металла и кристаллизации бемита с выделением теплоты кристаллизации (рис. 4). Образовавшиеся кристаллы обладают дефектной структурой, так как, по-

видимому, пленки оксидов разрастаются вширь быстрее, чем в высоту. На этом заканчивается цикл, который может неоднократно повторяться, пока рост толщины гидрооксидной пленки не приведет к такому снижению напряженности электрического поля двойного слоя, которая уже недостаточна для вырывания ионов Al^{3+} из металла, а уменьшение дефектности кристаллической решетки гидрооксида затруднит ее диффузионный рост. На кинетику описанного процесса оказывают сильное влияние температура гидрооксидного слоя (влияющая на скорость диффузии ионов) и концентрация хлоридов в воде.

Предполагаемая модель качественно описывает процессы взаимодействия алюминия в высокодисперсной фазе с водой и может послужить основой разработки технологии получения порошков и переработки их в готовые изделия.

RESEARCH OF PROCESSES OF FORMATION OF OXIDE LAYERS ON THE SURFACE OF WATER-PUVERIZED ALUMINIUM POWDERS

K. V. Levochko, A. F. Lednianskii

The composition and phase transformations in hydrooxid layers and hydrogen isolation kinetics under powders-water interaction are studied. A model describing qualitatively the processes of interaction of highly dispersed aluminium powder with water is developed. It is found that cyclic processes of crystallization and missequencing of hydrooxides structure take place under interaction of aluminium powders with water.

УДК 621.989:(681.14:658.512)

© Н. Н. Убизький¹, В. В. Филипенко², Г. И. Щупляк², Ю. В. Оловаренко²

¹Дніпропетровський національний університет. Фізико-технічний інститут

²ДП «ВО Південний машинобудівний завод ім. А. М. Макарова»

ИЗГИБ И ВЫПРЯМЛЕНИЕ ЛИСТА В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Дано оцінку впливу різних факторів на потоншення матеріалу, що переміщується по краю матриці. Приведено формули і розрахунки товщини матеріалу після згину і випрямлення залежно від відносного радіуса матриці та сили притискання.

Схема четырехугольной гибки, показанная на рис. 1, применяется при штамповке профилей, скоб и других деталей преимущественно небольшой высоты H в качестве альтернативной по отношению к двух угольной гибке по переходам.

Подобных деталей в сборочных конструкциях

изделий ракетно-космической техники очень много, поэтому в цикле их изготовления они занимают значительное место. Требования к точности размеров и форм деталей достаточно высоки. Технология изготовления таких деталей заключается в получении разверток деталей с использованием раздели-

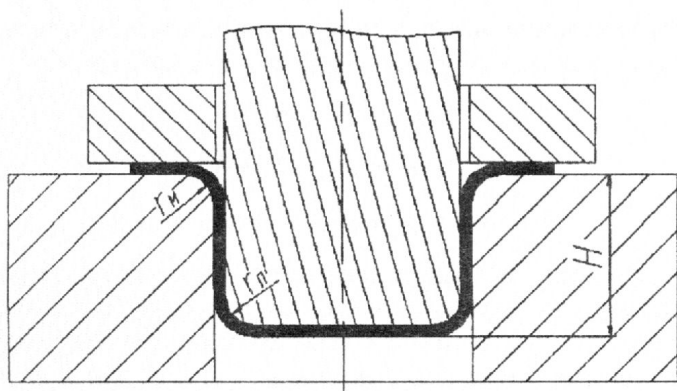


Рис. 1. Деформирование заготовки в штампе с прижимом

тельных операций холодной штамповки и последующей их гибки. Вертикальные стенки детали формируются из материала, подвергшегося изгибу и выпрямлению в условиях плоской деформации. Подобная схема имеет место также при вытяжке коробок, за исключением скругленных углов.

Развертками деталей, изготавливаемых методами гибки, называют плоские листовые заготовки, контур которых выполнен таким, что дополнительной обработки не требуется. Технология получения гнутых деталей из заготовок, не имеющих припуска, выгодна по следующим причинам: исключается операция обрезки контура заготовок после гибки, сокращаются отходы металла.

Основной недостаток данной технологии — низкая точность деталей по некоторым линейным размерам, фактические размеры которых зависят от распределения деформаций в изогнутой заготовке. Отклонения указанных размеров от требуемых значений могут быть как случайными, так и систематическими. Первые вызваны различиями свойств заготовок в условиях гибки, вторые — ошибками расчета размеров разверток.

Необходимость корректирования размеров разверток гнутых деталей возникает в условиях многономенклатурного листоштамповочного производства довольно часто. Она выявляется после апробирования гибочных штампов и влечет за собой неоправданные материальные затраты на переделку штампов для вырубки разверток. Опережающее изготовление гибочной оснастки по отношению к вырубным штампам позволяет избежать указанных затрат, однако это практикуется редко из-за сжатых сроков подготовки производства.

Ошибки размеров разверток объясняются тем, что методы их расчета, рекомендуемые в справочной литературе, не учитывают существенные особенности некоторых распространенных способов гибки.

Точность расчета разверток в данном случае зависит от правильного прогноза утонения стенок детали, образующихся из деформированного материала. На кромке матрицы, скругленной радиусом, материал подвергается изгибу и последующему спрямлению при одновременном действии на него растягивающих сил. Утонение материала при этом значительно больше, чем при обычной гибке — по пуансону, оно охватывает участки заготовки большей протяженности, поэтому образующая серединной поверхности заготовки может удлиняться на несколько миллиметров.

Формула погонной силы деформирования [3]

$$N_2 = \left(N_1 + \frac{\sigma_s h^2}{2r + h} \right) e^{1.57\mu} \quad (1)$$

даст завышенный результат и, как следствие, весьма грубую оценку утонения.

Проанализируем роль следующих факторов, не учитываемых данной формулой:

- уменьшение изгибающих моментов под действием продольных сил;
- упрочнение материала;
- давление кромок матрицы и радиальные напряжения.

На рис. 2 показаны эпюры напряжений изгиба и выпрямления жестко-пластического материала. Абсолютная величина разности тангенциальных (σ_θ) и радиальных (σ_ρ) напряжений в условиях плоской деформации равна $1.15\sigma_s$; площадь эпюр σ_θ заштрихована. При гибке напряжение σ_ρ отрицательно, а при уменьшении кривизны — положительно. Нижняя эпюра соответствует выпрямлению материала, опирающегося на кромку матрицы, поэтому σ_ρ становится положительным лишь на некотором удалении от поверхности контакта.

Выражения напряжений изгиба:

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= -\sigma_s \ln[(r + h)/\rho], \\ \sigma_\theta &= \sigma_s \{1 - \ln[(r + h)/\rho]\}, \quad \rho = \rho_{n1}, \\ \sigma_\rho &= -\sigma_s \ln[(r + h)\rho/\rho_{n1}^2], \\ \sigma_\theta &= -\sigma_s \{1 + \ln[(r + h)\rho/\rho_{n1}^2]\}, \quad \rho = \rho_{n1} \end{aligned} \quad (2)$$

используем также для процесса выпрямления, изменяя знаки перед символом σ_s , а также обозначение нейтрального радиуса напряжений ρ_{n1} на ρ_{n2} . Множителя 1.15 условия пластичности нет, что не отражается на расчетах утонения.

Толщину изогнутого участка h_1 принимаем постоянной, отличающейся от исходной h_0 на величину утонения, полученного при изгибе. Интегрируя

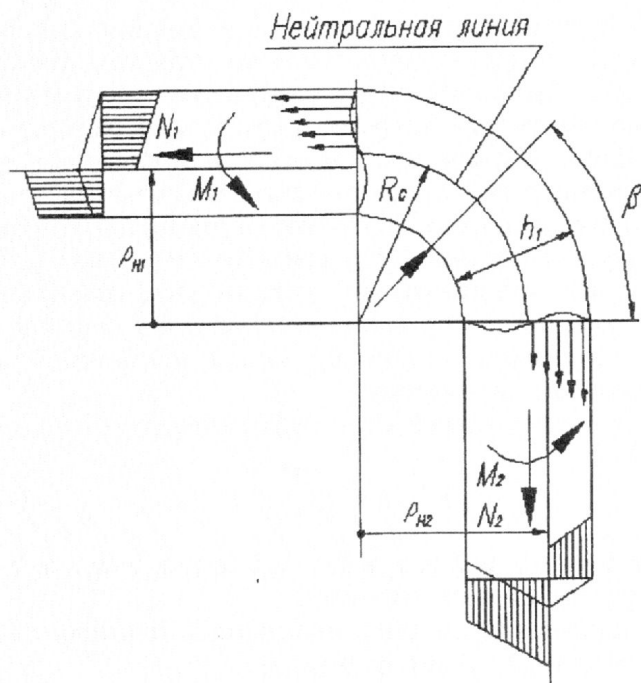


Рис. 2. Расчетная схема изгиба и выпрямления материала

выражения σ_θ по координате ρ от $\rho = r$ до $\rho = r + h_1 = R$, получаем формулы погонных сил N_1 , N_2 и моментов M_1 , M_2 , записанные в обобщенном виде:

$$N_{1,2} = \pm \sigma_s r \ln \frac{Rr}{\rho_{n1,2}^2}, \quad (3)$$

$$M_{1,2} = \frac{\sigma_s}{4} \left(R^2 - 2\rho_{n1,2}^2 + r^2 - 2Rr \ln \frac{Rr}{\rho_{n1,2}^2} \right).$$

Для нахождения толщины h_1 необходимо связать ее с нейтральным радиусом напряжений ρ_{n1} условием постоянства площади сечения заготовки. Нейтральный радиус деформаций удобно выразить как $(\rho_1 + \rho_2)/2$ через радиусы ρ_1 и $\rho_2 = \rho_{n1}^2/\rho_1$, ограничивающие область неизменного размера $\rho_2 - \rho_1$ [1]. Принимая $\rho_1 = r$, $\rho_2 = \rho_{n1}^2/r$, запишем условие постоянства площади:

$$(r + h_1)^2 - r^2 = \left(r + \frac{\rho_{n1}^2}{r} \right) h_0.$$

Сила N_1 считается заданной, согласно (3) $\rho_{n1}^2 = r(r + h_1)E_x$, где $E_x = \exp[-N_1/(\sigma_s r)]$. Из условия постоянства площади и выражения ρ_{n1}^2 получаем

$$h_1 = \frac{h_0}{2} E_x - r + \sqrt{\left(\frac{h_0}{2} E_x - r \right)^2 + r h_0 (1 + E_x)}. \quad (4)$$

Параметры изгиба подсчитываем в последовательности: h_1 , ρ_{n1} , M_1 по заданным значениям h_0 , r , N_1 .

Чтобы определить положение нейтрального слоя

выпрямления материала ρ_{n2} , необходимо обратиться к уравнениям равновесия сил и моментов:

$$P \cos \beta + T_2 - N_1 = 0,$$

$$P \sin \beta - N_2 - T_1 = 0,$$

$$M_1 + M_2 + [P \cos \beta + T_2 - N_2] R_p = 0.$$

На рис. 2 показаны силы и моменты на границах изогнутого участка, за исключением перерезывающих сил $T_{1,2}$, а также равнодействующая давления P кромки матрицы. С помощью первого уравнения исключим из третьего P и T_2 , тогда

$$N_2 = N_1 + (M_1 + M_2)/R_p. \quad (5)$$

Известно, что изгибающие моменты и продольные силы связаны обратной зависимостью, которая в соответствии с (5) должна вызвать уменьшение расчетных значений N_2 по сравнению с (1).

Формулы (3) для N_2 и M_2 образуют вместе с (5) систему трех уравнений с тремя неизвестными: N_2 , M_2 , ρ_{n2} . Она решается численно, например программой MathCAD, примеры расчетов представлены в табл. 1, где использованы обозначения $\bar{N}_{1,2} = N_{1,2}/(\sigma_s h_0)$, $\bar{M}_{1,2} = M_{1,2}/(\sigma_s h_0^2)$.

Толщину заготовки после выпрямления рассчитывали по формуле

$$h_2 = \frac{(2rh + h_1^2)(r + h_1)}{\rho_{n2}^2 + (r + h_1)^2}.$$

Она получена аналогично формуле (4), границы области неизменного размера $\rho_2 - \rho_1$ при выпрямлении равны: $\rho_2 = r + h_1$, $\rho_1 = \rho_{n2}^2/(r + h_1)$.

Данные табл. 1 (первое число) обнаруживают важную роль радиального напряжения и давления кромки матрицы при относительных радиусах гибки $r/h_0 \leq 1$. Она заключается в уменьшении моментов эпюр тангенциального напряжения M_1 и M_2 , соответственно уменьшается и сила деформирования N_2 . Числа в скобках подсчитаны при нулевом радиальном напряжении, при этом значения N_2 также меньше, что отражает влияние растягивающих сил на величину моментов.

С учетом радиального напряжения при $r/h_0 \leq 1$ утонение материала $\Delta h = h_0 - h_2$ существенно возрастает, несмотря на уменьшение силы N_2 . Это объясняется тем, что необходимое значение N_2 достигается при большем смещении нейтрального радиуса напряжений ρ_{n2} в направлении наружного радиуса изогнутого участка. Заметим, что рассчитанные значения толщины h_2 могут оказаться за пределами ресурса пластичности материала, что не

Таблица 1. Расчетные значения параметров изгиба и выпрямления материала с учетом и без учета радиального напряжения (в скобках)

r/h_0	\bar{M}_1	h_1/h_0	h_2/h_0	\bar{M}_2	\bar{N}_2	\bar{N}_2^*
$\bar{N}_1 = 0$						
0.5	0.25 (0.25)	1.0 (1.0)	0.786 (0.816)	0.118 (0.199)	0.368 (0.449)	0.500
1.0	0.25 (0.25)	1.0 (1.0)	0.896 (0.905)	0.200 (0.225)	0.300 (0.317)	0.333
2.0	0.25 (0.25)	1.0 (1.0)	0.961 (0.962)	0.235 (0.240)	0.194 (0.196)	0.200
4.0	0.25 (0.25)	1.0 (1.0)	0.988 (0.988)	0.246 (0.247)	0.110 (0.110)	0.111
$\bar{N}_1 = 0.1$						
0.5	0.182 (0.223)	0.867 (0.949)	0.672 (0.756)	0.068 (0.163)	0.368 (0.496)	0.600
1.0	0.215 (0.231)	0.937 (0.966)	0.820 (0.855)	0.152 (0.196)	0.350 (0.388)	0.433
2.0	0.232 (0.238)	0.971 (0.980)	0.916 (0.927)	0.206 (0.220)	0.276 (0.284)	0.300
4.0	0.240 (0.242)	0.986 (0.989)	0.963 (0.967)	0.230 (0.234)	0.205 (0.206)	0.211
$\bar{N}_1 = 0.2$						
0.5	0.124 (0.190)	0.764 (0.894)	0.580 (0.697)	0.030 (0.128)	0.375 (0.536)	0.700
1.0	0.177 (0.207)	0.882 (0.932)	0.754 (0.807)	0.109 (0.165)	0.398 (0.454)	0.533
2.0	0.208 (0.220)	0.943 (0.960)	0.874 (0.893)	0.173 (0.196)	0.354 (0.368)	0.400
4.0	0.224 (0.229)	0.973 (0.978)	0.941 (0.946)	0.209 (0.217)	0.296 (0.299)	0.311

Значения \bar{N}_2^* подсчитаны по формуле (1) при нулевом коэффициенте трения μ

учитывается в предлагаемом решении.

При $r/h_0 \geq 2$ можно упростить расчет, приняв $\sigma_r = 0$, $\sigma_\theta = \pm \sigma_s$. Соответствующие формулы приведены ниже в последовательности расчета параметров изгиба и выпрямления листа по заданным значениям h_0 , r , N_1 :

$$\begin{aligned}
 h_1 &= -r + 0.5h_0 + \sqrt{(r - 0.5h_0)^2 + 2rh_0 - N_1h_0^2}, \\
 \rho_{n1} &= r + 0.5h_1 - 0.5\bar{N}_1h_0, \\
 \rho_{n2} &= \sqrt{0.5(2r + h_1)^2 + 0.5h_1^2 - \rho_{n1}^2}, \\
 h_2 &= \frac{2rh_1 + h_1^2}{2\rho_{n2}}, \\
 M_{1,2} &= \sigma_s [(2r + h_1)\rho_{n1,2} - \rho_{n1,2}^2 - r(r + h_1)], \\
 N_2 &= \sigma_s (2\rho_{n2} - 2r - h_1).
 \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь формула для ρ_{n2} получена из условия равновесия (5), которому таким образом удовлетворяют выражения сил и моментов, при этом $N_1 = \sigma_s(2r + h_1 - 2\rho_{n1})$. Результаты расчетов по формулам (6) приведены в табл. 1 (в скобках).

Более точное определение силовых параметров требует использования функции упрочнения материала. Формулы сил и моментов получаем интегрированием по толщине листа выражения, содержащего тангенциальное напряжение $\sigma_\theta = \pm 1.15A(1.15\varepsilon_\theta)^n$ с подстановкой $\varepsilon_\theta = |(\rho - \rho_n)/\rho_n|$.

Результаты интегрирования:

$$N_{1,2} = \frac{1.15^{n+1}A}{(n+1)\rho_{n1,2}^n} \left[\left(\frac{h_1}{2} + c_{1,2} \right)^{n+1} - \left(\frac{h_1}{2} - c_{1,2} \right)^{n+1} \right],$$

$$M_{1,2} =$$

$$= \frac{1.15^{n+1}A}{(n+2)\rho_{n1,2}^{n+1}} \left[\left(\frac{h_1}{2} - c_{1,2} \right)^{n+2} + \left(\frac{h_1}{2} + c_{1,2} \right)^{n+2} \right] - N_{1,2}c_{1,2}.$$

Здесь $c_1 = r + 0.5h_1 - \rho_{n1}$, $c_2 = \rho_{n2} - r - 0.5h_1$, A , n — константы степенной функции напряжения текучести σ_s .

Параметры упрочнения практически не отражаются на расчетных значениях утонения материала. Например, при $n = 0.1$ и $N = 0$ $h_2 = 0.82$, 0.908 , 0.964 соответственно для относительных радиусов $r/h_0 = 0.5$, 1.0 , 2.0 . При $n = 0.2$ аналогичные значения $h_2 = 0.823$, 0.91 , 0.965 . Отличие от соответствующих чисел в скобках (табл. 1) не превышает 0.5% . Следовательно, утонение можно рассчитывать без учета упрочнения материала.

Трение на скругленной кромке матрицы увеличивает силу N_2 , поэтому согласно (1) правую часть уравнения (5) рекомендуется умножать на $K = \exp(1.57\mu)$. При коэффициенте трения $\mu = 0$, 1 и $K = 1.17$ расчетные значения параметров выпрямления приведены в табл. 2.

Сравнение данных табл. 1 и 2 подтверждает существенное влияние трения на силу деформирования N_2 , ее значения возросли приблизительно на 10% . В результате учета трения расчетная толщина выпрямленного материала изменилась мало: при $r/h_0 = 0.5$, 1.0 , 2.0 уменьшение значений h_2 составило от 3 до 1% . Таким образом, наибольшее влияние на величину утонения материала оказывают радиальное напряжение и фактор зависимости изгибающих моментов от растягивающих сил.

Полученное решение относится к операции, ко-

Таблица 2. Расчетные значения параметров выпрямления материала с учетом радиального напряжения и трения

r/h_0	h_2/h_0	\bar{M}_2	\bar{N}_2
$\bar{N}_1 = 0$			
0.5	0.766	0.091	0.399
1.0	0.881	0.185	0.339
2.0	0.955	0.230	0.225
4.0	0.986	0.245	0.129
$\bar{N}_1 = 0.1$			
0.5	0.653	0.043	0.399
1.0	0.805	0.133	0.394
2.0	0.908	0.196	0.318
4.0	0.960	0.225	0.238
$\bar{N}_1 = 0.2$			
0.5	0.563	0.062	0.407
1.0	0.738	0.085	0.447
2.0	0.864	0.157	0.407
4.0	0.936	0.199	0.344

торая приводит к одновременному образованию четырех углов в сечении заготовки. Вначале материал изгибается на матрице и пуансоне, причем на кромках матрицы изгиб происходит с двух сторон, моменты M_1 и M_2 имеют разные знаки. После достижения углов гибки 90° на кромке матрицы происходит изгиб и выпрямление материала, направление M_2 изменяется на противоположное, сила N_2 резко возрастает, согласно (5), и в дальнейшем остается стабильной. Приведенные формулы позволяют прогнозировать утонение материала с учетом всех значимых факторов.

Следует обращать большое внимание на подготовку материала под гибку. Горячекатаную сталь целесообразно протравить перед гибкой, так как наличие окалины ведет к быстрому износу штампа.

Если требуется получить детали с точными размерами угла между полками и радиуса изгиба, то следует заготовки подвергнуть нормализации или отжигу. Небольшие заготовки целесообразно перед гибкой подвергать обкатке в барабане. Часто при гибке применяется зачистка кромок заготовок. Заготовки следует укладывать в штамп менее качественной стороной в сторону пуансона, чтобы растягивающие напряжения не вызвали развития дефектов, имеющих на заготовке [2].

При вытяжке, в отличие от гибки, радиусы матрицы намного превышают толщину заготовки, поэтому утонение прямых стенок изделий типа коробок невелико. Применение перетяжных ребер меняет картину, но в этом случае становится существенным фактор зависимости напряжения текучести от циклического изменения знака среднего напряжения [4].

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975.—399 с.
2. Мошин Е. Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. — М.: Машиностроение, 1959.—360 с.
3. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. — М.: Машиностроение, 1977.—278 с.
4. Sanchez L. R. A new cyclic anisotropic model for plane strain sheet metal forming // IJMS.—2000.—42.—P. 705—728.

BENDING AND STRAIGHTENING THE SHEET IN PLANE DEFORMATION CONDITIONS

N. N. Ubizkii, V. V. Filipenko, G. I. Schupliak,
Yu. V. Olovarenko

We estimated the action of various factors on the tapering material moving along the die edge. We give the formulas and calculated values of material thickness after bending and straightening, depending on relative radius of the die and pressing force.

УДК 621.6.01.02/02

ИМПУЛЬСНАЯ ФУНКЦИЯ В МОДЕЛИРОВАНИИ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВЫ

© Г. И. Сокол, У. Н. Тучина

Дніпропетровський національний університет

Розглянуто різноманітні методи інтенсифікації сплавів металів. Запропоновано спосіб поліпшення перемішування розплавів за допомогою періодичних ударних хвиль.

Введение. Свойства материалов на основе алюминия и железа, очень важных для современного ракетостроения, в значительной степени определяются технологическим процессом получения их

расплавов. Важную роль здесь играют перемешивание, рафинирование, т. е. освобождение от неметаллических твердых включений, дегазация. Важно также оптимально решить задачи повышения ин-