

Отвержденные по разработанной технологии образцы подвергали механическим испытаниям.

Установлено, что ИК нагрев в сравнении с конвективным отверждением обеспечивает повышение прочностных характеристик до 20 %.

Показано, ИК нагрев интенсифицирует процесс отверждения благодаря воздействию квантов энергии $h\nu$ на развитие химических реакций между макромолекулами.

Библиографические ссылки

1. **Борхерт Р.** Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.
2. Журнал Всесоюзного химического общества Д.И. Менделеева. – № 3. – 1978.
3. **Джур С.О.** Полімерні композиційні матеріали в РКТ / С. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько. – К. : Вища школа, 2003. – 399 с.
4. Технология намоточных изделий ОСТ-92-901, ОСТ-92-902.

Надійшла до редколегії 17.04.2016

УДК 629.78

Е. Г. Седачова, Н. Н. Убизький, А. В. Кулик

*Днепропетровский колледж ракетно-космического машиностроения
Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара*

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ФОРМОИЗМЕНЯЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ

Наведено методику теоретичного аналізу операцій листового штампування.

Ключові слова: методика, теоретичний аналіз, операції листового штампування.

Приведена методика теоретического анализа операции листовой штамповки.

Ключевые слова: методика, теоретический анализ, операции листовой штамповки.

Methods over of theoretical analysis of operations of the sheet stamping are brought.

Keyword: methods, theoretical analysis, operations of the sheet stamping.

Постановка задачи. Математически строго решить задачу по отысканию полей напряжений и деформаций в деформируемой листовой заготовке с учетом всех существенно влияющих факторов практически невозможно. Это объясняется нестационарностью процесса деформирования и обилием факторов, влияющих на поля напряжений и деформации. Поэтому обычно при анализе операций листовой штамповки используют ряд допущений, связанных со схематизацией механических свойств материала заготовки и условий ее нагружения, а также с ограничением числа учитываемых в анализе факторов, влияющих на процесс деформирования.

Ценность полученного в результате анализа решения тем выше, чем больше число учтенных в анализе факторов и чем более точно отражают найденные в результате решения функциональные зависимости реальный процесс деформирования. В то же время для инженерной практики желательно, чтобы результаты решения были достаточно просты и, по возможности, завершались установлением зависимостей, выраженных в аналитических функциях.

Решение, удовлетворяющее указанным, по существу, противоречивым требованиям, получают путем рациональной схематизации условий нагружения и свойств материала при одновременном использовании упрощающих анализ допущений, приемлемость которых может быть оценена или математически, или постановкой специальных целенаправленных экспериментов. Такое решение требует не только хорошего знания основ теории пластичности, но и определенной изобретательности в отыскании путей простейшего решения сложных вопросов.

Основная часть. При анализе операций листовой штамповки основным уравнением является уравнение равновесия. Так как в основной части очага деформации напряжения по толщине заготовки изменяются незначительно (за исключением участков, в которых элементы заготовки получают резкое изменение кривизны срединной поверхности), поэтому обычно используют уравнение равновесия элемента, конечного в одном измерении (по толщине заготовки).

В процессе деформирования при формоизменяющих операциях толщина заготовки изменяется и становится в очаге деформации функцией координат. Следовательно, в общем случае целесообразно использовать уравнение равновесия оболочки переменной толщины.

Обычно в формоизменяющих операциях заготовка в очаге деформации контактирует с рабочей поверхностью одного из деформирующих инструментов (с пуансоном или матрицей). В этом случае нормальные и касательные напряжения действуют на одной поверхности заготовки, в то время как противоположная свободна от внешних нагрузок.

В некоторых случаях (вытяжка с прижимом, штамповка эластичными средами) обе поверхности заготовки нагружены внешними силами. И в первом, и во втором случаях уравнение равновесия может быть получено при отнесении всех сил к срединной поверхности заготовки.

Для случаев осесимметричного деформирования общее уравнение равновесия, учитывающее переменность толщины по координате ρ , трение на контактных поверхностях, затрудняющее течение металла, и наличие контактных нормальных напряжений, вызванных, например, действием прижима, может быть представлено в виде:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left(1 + \frac{\rho d_s}{s d\rho} \right) - \sigma_\theta - \frac{\mu \rho}{\sin \alpha} \left(\frac{2q}{s} + \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right), \quad (1)$$

где σ_ρ и σ_θ – нормальные (средние по толщине) напряжения, действующие в меридиональном и широтном направлениях; ρ – расстояние от рассматриваемого элемента до оси симметрии; s – толщина заготовки; μ – коэффициент трения; α – угол между касательной к срединной поверхности рассматриваемого элемента и осью симметрии; q – удельное усилие, созданное внешним усилием (например, усилием прижима), приложенное к поверхности заготовки (в формулу (1) следует

подставитъ со знаком минус, так как всегда сжимающее); R_ρ и R_θ – радиусы кривизны срединной поверхности элемента соответственно в меридиональном и широтном сечениях (положительны, если центр кривизны и ось симметрии расположены по одну сторону от рассматриваемого элемента).

Уравнение (1) является достаточно общим и может быть использовано при анализе практически всех формоизменяющих операций листовой штамповки без принудительного утонения заготовки при наличии осевой симметрии деформирования.

В общем случае s , R_ρ и α являются некоторыми функциями координаты ρ , что существенно усложняет решение и затрудняет получение решения в виде аналитических функций. В зависимости от требуемой точности, а также в зависимости от целей анализа, для упрощения решения возможна аппроксимация зависимостей s , R_ρ и α от координаты ρ аналитическими функциями, упрощающими интегрирование и позволяющими за счет этого получать решение в замкнутом виде.

Однако даже в самой простой постановке $\left(\frac{ds}{d\rho} = 0, \quad q = 0, \quad R_\rho = const \right)$

задача является статически неопределимой (σ_ρ и σ_θ неизвестны) и для решения требуется еще одно уравнение. Таким уравнением может быть уравнение пластичности.

При анализе формоизменяющих операций листовой штамповки широко используют допущение о том, что заготовка деформируется в условиях, близких к схеме плоского напряженного состояния, а влиянием контактных напряжений на условие перехода в пластическое состояние можно пренебречь. Это допущение не вносит существенно погрешности в получаемое решение, если нормальные и касательные напряжения на контактных поверхностях в очаге деформации существенно меньше напряжения текучести.

Уравнение пластичности для плоского напряженного состояния при осесимметричном деформировании имеет вид:

по гипотезе максимальных касательных напряжений

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_s, \quad (2)$$

по энергетической гипотезе

$$\sigma_\rho^2 - \sigma_\rho \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_s^2, \quad (3)$$

где σ_s – напряжение текучести.

Как следует из приведенных уравнений, по энергетической гипотезе (которая для пластичных металлов более точно отражает условие перехода в пластическое состояние) для всех схем напряженного состояния существует одна запись уравнения пластичности.

При использовании гипотезы максимальных касательных напряжений для получения записи уравнения пластичности необходимо выяснить схему напряженного состояния и установить, какие из напряжений являются

максимальними и какие – минимальными. Так, при принятых обозначениях σ_p и σ_θ уравнение пластичности имеет вид:

– для вытяжки и раздачи

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \pm \sigma_s, \quad (2a)$$

(верхний знак для вытяжки, нижний – для раздачи),

– для отбортовки и обжима

$$\sigma_\theta = \pm \sigma_s, \quad (2б)$$

(верхний знак для отбортовки, нижний – для отжима).

Так как разница в значениях напряжений, соответствующих переходу от упругих деформаций к пластическим, по обеим гипотезам не превышает 15 % от напряжения текучести, то обычно выбирают ту запись уравнения пластичности, которая дает наиболее простое решение.

Напряжение текучести в общем случае зависит от величины деформации, полученной рассматриваемым элементом к данному моменту деформирования, а также от скорости деформации. Для металлов в условиях холодной деформации влияние скорости деформации на величину напряжения текучести незначительно, и штамповке на обычном оборудовании этим влиянием можно пренебречь. Однако, при высокоскоростной штамповке (взрывная, электромагнитная и т. п.) влиянием скорости деформации на величину напряжения текучести пренебрегать нежелательно.

В условиях обычной холодной листовой штамповки напряжение текучести, в основном, зависит от деформации, которая обуславливает упрочнение. Так как деформации, полученные элементами очага деформации, в рассматриваемый момент деформирования обычно различны, то напряжение текучести в очаге деформации являются функцией координат.

Таким образом, для получения решения при анализе операций листовой штамповки желательно установить функциональную зависимость напряжений текучести от деформаций и найти распределение деформаций в очаге для рассматриваемого момента деформирования.

Для упрощения решения обычно стремятся аппроксимировать зависимость деформации от координат и напряжений от деформаций аналитическими функциями, которые с приемлемой точностью отражали бы действительность и в то же время позволяли получить не слишком громоздкое решение.

Решение может быть получено на основе уравнений (1) и (2) или (3), в которых $\sigma_s = f(\rho)$. Однако в ряде случаев не удастся подобрать функции $\sigma_s = \varphi(\varepsilon) = f(\rho)$ такими, чтобы интегрирование выполнялось достаточно просто и решение было получено в аналитических функциях. В таких случаях худшую, но приемлемую точность решения можно получить, если принять напряжение текучести постоянным для всего очага деформации и равным среднему его значению (среднему интегральному или среднему арифметическому от максимального и минимального значения напряжения текучести в очаге деформации).

Как было отмечено ранее, уравнение (1) справедливо для случаев, когда напряжение σ_p и σ_θ незначительно изменяются по толщине заготовки. По

существо, уравнение (1) соответствует условию безмоментного деформирования, при котором кривизна срединной поверхности в процессе деформирования заготовки изменяется незначительно.

В формоизменяющих операциях листовой штамповки это условие обычно выполняется для большей (по протяженности) части очага деформации. Однако в очаге деформации имеются участки, в которых перемещение элементов заготовки относительно рабочих поверхностей инструмента сопровождается существенным изменением кривизны их срединной поверхности. В таких участках действие изгибающих моментов на поля напряжения оказывается значительным и решение следует искать, основываясь на уравнениях моментной теории оболочек. Однако решения по моментной теории оболочек, как правило, оказываются весьма сложными. В то же время с приемлемой точностью можно учесть влияние резкого изменения кривизны срединной поверхности, считая, что на участке резкого изменения кривизны (с увеличением кривизны – изгиб или с ее уменьшением – спрямление) абсолютное значение напряжения σ_ρ , найденное по безмоментной теории (уравнения (1), (2) и (3)), скачкообразно возрастает на величину, определяемую по формуле

$$|\Delta\sigma_\rho| = \frac{1}{4}\sigma_s \frac{s}{R_{\rho_1}} \left(1 - \frac{R_{\rho_1}}{R_{\rho_2}}\right), \quad (4)$$

где $R_{\rho_2} > R_{\rho_1}$ – значения радиусов кривизны срединной поверхности заготовки на границах участка очага деформации, в котором перемещение элементов заготовки относительно рабочих поверхностей инструмента сопровождается значительным изменением кривизны их срединных поверхностей.

В случае, если на участке резкого изменения кривизны срединной поверхности элементов радиуса R_ρ изменяется от конечного значения до бесконечности или наоборот ($R_{\rho_2} = \infty$), формула (4) принимает более простой вид:

$$|\Delta\sigma_\rho| = \frac{1}{4}\sigma_s \frac{s}{R_\rho}. \quad (4a)$$

Действие изгибающих моментов и перерезывающих сил может привести к тому, что образуются участки очага деформации, в которых элементы заготовки деформируются (происходят линейные деформации срединной поверхности и изменение ее кривизны) без контакта с рабочими поверхностями. Такие участки назовем участками свободного изгиба. В участках свободного изгиба кривизна срединной поверхности, строго говоря, переменна: $R_\rho = f(\rho)$. Однако без большой погрешности (учитывая то обстоятельство, что обычно протяженность участков свободного изгиба в меридиональном направлении существенно меньше размеров очага деформации) при решении задачи по отысканию полей напряжений (а иногда даже и полей деформации) можно принять, что на участке свободного изгиба кривизна постоянна ($R_\rho = const$) и скачкообразно изменяется на границах участка

свободного изгиба. Величины средних значений радиуса кривизны на участке свободного изгиба приближенно можно определить по следующим выражениям:

– для участков, в которых σ_ρ близко к нулю

$$R_\rho = \frac{\sqrt{Rs}}{\sin \alpha}; \quad (5)$$

– для участков, в которых σ_ρ близко к напряжению текучести

$$R_\rho = \frac{\sigma_s s}{4\sigma_\rho(1 - \sin \alpha)}; \quad (6)$$

где R – радиус заготовки в участке свободного изгиба (расстояние от границы свободного изгиба по срединной поверхности до оси симметрии); остальные величины известны.

Выводы. В данной статье кратко изложены основные положения методики анализа формоизменяющих операций листовой штамповки, которая позволяет получать простейшие решения, обладающие приемлемой для практических расчетов точностью. Обоснование некоторых положений этой методики можно найти в [1; 2]. Подход к решению задач, связанных с формоизменяющими операциями листовой штамповки по этой методике, частично будет проиллюстрирован при рассмотрении основных операций листовой штамповки.

Использование уравнения (1) и уравнения пластичности (2) для плоского напряженного состояния для отыскания полей напряжений и деформаций дает удовлетворительную точность решения в случае, если радиусы кривизны срединной поверхности превышают толщину заготовки более чем в 10 раз или если криволинейный участок составляет малую долю общего очага деформации. При малых радиусах кривизны точность решения может быть выше, если использовать уравнение пластичности для объемной схемы напряженного состояния, по-прежнему относя все силы в уравнении равновесия к срединной поверхности, т.е. усредняя величины напряжений по толщине заготовки. В этом случае в качестве третьего главного нормального напряжения в уравнении пластичности может быть

принято напряжение $\sigma_z = \frac{\sigma_\kappa}{2}$, где σ_κ – нормальное напряжение на контактной поверхности, величину которого можно определить по уравнению Лапласа

$$\frac{\sigma_\kappa}{s} = \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\rho}{R_\theta}.$$

Применение уравнения пластичности для объемной схемы напряженного состояния по энергетической гипотезе обычно приводит к значительным математическим трудностям. При использовании уравнений пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений получим уравнения пластичности следующего вида:

– для обжима

$$\sigma_z - \sigma_\theta = \sigma_s \text{ при } |\sigma_z| < |\sigma_\rho| \text{ и } \sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s \text{ при } |\sigma_z| > |\sigma_\rho|;$$

– для раздачи

$$\sigma_\theta - \sigma_z = \sigma_s \text{ при } |\sigma_z| > |\sigma_\rho| \text{ и } \sigma_\theta - \sigma_\rho = \sigma_s \text{ при } |\sigma_z| < |\sigma_\rho|;$$

– для отбортовки $\sigma_\theta - \sigma_z = \sigma_s$, для всего очага деформации.

Для вытяжки напряжение σ_z является средним для всего очага деформации и по гипотезе максимальных касательных напряжений не оказывает влияния на условие перехода в пластическое состояние.

Уравнение пластичности в приведенном выше написании совместно с уравнением (1) позволяет получать решения, более точно отражающие действительность при значительно меньших относительных радиусах кривизны срединной поверхности, по сравнению с решениями, в которых уравнение пластичности соответствует плоскому напряженному состоянию.

Библиографические ссылки

1. **Сторожев М. В.** Основы теории обработки металлов давлением / М. В. Сторожев. – М., 1959. – 539 с.
2. **Попов Е. А.** Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М., 1968. – 283 с.

Надійшла до редколегії 29.06.2016

УДК 534-6

Г. И. Сокол, В. Ю. Котлов, К. С. Щербина

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В РУПОРЕ НА ИНФРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ

В данной работе путем измерений экспериментально получены амплитудно-частотные характеристики функций колебательной скорости, звукового давления и фазовых соотношений между ними в горле рупора катеноидальной формы на инфразвуковых частотах. Анализ полученных результатов позволил выявить резонансные явления и определить их частоты.

Ключевые слова: акустические колебания, инфразвук (ИЗ), рупор, катеноидальная форма, эксперимент, резонансные явления.

В цій роботі шляхом вимірювань експериментально отримано амплітудно-частотні характеристики функцій коливальної швидкості, звукового тиску і фазових відношень між ними в горлі рупору катеноїдальної форми на інфразвукових частотах. Аналіз отриманих результатів дозволив виявити резонансні явища та визначити їх частоти.

Ключові слова: акустичні коливання, інфразвук (ІЗ), рупор, катеноїдальна форма, експеримент, резонансні явища.

In this paper, the experimentally obtained by measuring the amplitude and frequency characteristics of the functions of the vibration velocity, of sound pressure and phase relationships between them in the throat of the kathenoid form horn on infrasonic frequencies. Analysis of the results revealed a resonance phenomenon and determine their frequency.

Keywords: acoustic vibrations, infrasound (IS), horn of the kathenoid form, experiment, resonance phenomena.