

МЕХАНИЗМ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ КАЛИБРОВКЕ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Производство летательных аппаратов представляет собой одну из наиболее сложных и наукоемких отраслей машиностроения. В наше время одним из атрибутов промышленно-развитого государства является способность создавать и производить ракеты, самолеты и авиационные двигатели. Всего несколько стран в мире владеют полным циклом проектирования и производства летательных аппаратов, и к их числу относится и Украина. Одним из перспективных направлений развития машиностроения является замена технологических процессов, основанных на резании металла, экономичными методами формообразования.

Изделия авиационной техники характеризуются наличием в конструкции большого числа крупногабаритных тонкостенных деталей, выполненных из листового металла. Подобные детали находят применение также в изделиях судостроения и химического машиностроения. Отличительные особенности этих деталей обусловили применение в авиастроении методов производства, основанных на пластической деформации исходных заготовок.

Совершенствование конструкций летательных аппаратов, создание широкофюзеляжных самолетов и мощных авиадвигателей связано с наличием в конструкции крупногабаритных деталей из листа и применением высокопрочных материалов. Так, фюзеляж самолета, газотурбинный двигатель, корпус ракеты состоят из большого числа оболочек различной формы – гладких и подкрепленных, изотропных и анизотропных. Стремление уменьшить число разъемов и снизить массу конструкции приводит к значительному росту габаритных размеров деталей. Одновременно усложняются конструктивные формы оболочек, особенно подкрепленных специальными выштамповками, рифтами и другими элементами жесткости. В ряде случаев, например для создания кожухов ГТД, используют высокопрочные жаропрочные сплавы. Эти особенности порождают сложные технологические проблемы, необходимость совершенствования и создания новых процессов пластического формообразования деталей.

В целях совершенствования технологии производства ЛА реализуются мероприятия по использованию прогрессивных технологических процессов. К таким процессам относятся методы обработки с применением импульсных источников энергии, используя которые, можно реализовать большие давления к обрабатываемому материалу без применения громоздкого и металлоемкого прессового оборудования. Такая тех-

нология обеспечивает простоту и экономичность процесса, уменьшение количества оснастки и значительное сокращение сроков подготовки производства.

Основными преимуществами высокоэнергетических методов формообразования являются невысокие затраты на оборудование и оснастку при хорошем качестве изделий, универсальность оборудования, возможность получения деталей с высокой точностью размеров, возможность формовки крупногабаритных деталей из высокопрочных сплавов.

Использование импульсного нагружения при изготовлении деталей сложной замкнутой формы из высокопрочных материалов позволяет снизить трудоемкость и расход дорогостоящих материалов, исключить доводочные работы, обеспечить высокий ресурс и высокое качество выпускаемых изделий.

Известно, что точность геометрической формы и размеров детали является одним из основных признаков высококачественной продукции. Повышение точности изготовления деталей сокращает трудоемкость сборки конструкций вследствие частичного или полного устранения доводочных работ, способствует достижению взаимозаменяемости элементов, обеспечивает сокращение сроков ремонта изделий, находящихся в эксплуатации. Одним из способов обеспечения заданной точности формы и размеров деталей является использование импульсной калибровки. Такая операция является заключительной операцией и заключается в устранении погрешностей формы, оставшихся после выполнения предшествующих операций. В таблице представлены виды погрешностей формы деталей, которые устраняются с помощью калибровочных операций [1].

Таблица – Погрешности формы деталей, устраняемые калибровкой

Наименование групп деталей	Виды погрешности формы детали	
	Погрешности поперечного сечения	Погрешности продольного сечения
1. Цилиндры из листового материала	а) овальность; б) огранность; в) «домик»	а) непрямолинейность; б) корсетность; в) конусность; г) бочкообразность
2. Детали конусной, овальной, оживальной формы из листа	а) овальность; б) огранность	а) отклонение от требуемой геометрии образующей
3. Полые изделия из листа с дном и фланцем	а) отклонение от требуемой геометрии поперечного сечения	а) отклонение от требуемой геометрии образующей

Точность деталей при импульсном формообразовании зависит от точности изготовления рабочей полости матрицы, степени деформации заготовки, механических свойств штампуемого материала, прочности матрицы и величины прилагаемой к заготовке нагрузки. Относительно невысокая точность деталей при обычной штамповке является следствием изменения размеров детали после снятия нагрузки вследствие упругой разгрузки металла.

В принципиальном плане калибровка или устранение погрешностей формы от предыдущих технологических операций заключается в обеспечении полной релаксации упругих напряжений путем выдержки в прижатом состоянии с одновременным температурным или каким-либо другим видом воздействия. В силу продолжительности такого процесса (релаксация требует много времени из-за необходимости перестройки микроструктуры металла) и его энергоемкости (необходимо подогреть оснастку, а из-за высокой теплопроводности металлов тепло быстро рассеивается) он не находит широкого применения.

Другим технологическим процессом местного изменения формы является деформация металла до пластического состояния, которое сопровождается активными структурными процессами и в силу этого является более эффективным способом (менее продолжительным и энергоемким). Из рассмотрения физического закона деформирования

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)].\end{aligned}\quad (1)$$

следует, что даже при самом благоприятном положении, когда стеснены деформации по осям x и y , т.е. $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ (рис.1), для перевода металла в состояние текучести по осям x и y необходимо приложить давление

$$P = \sigma_z = \sigma_T \frac{1-\mu}{\mu}, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести материала.

Очевидно, что это высокоэнергетический процесс, а для его реализации необходима оснастка из прочных материалов, которые при напряжениях более двух пределов текучести выдержали бы многократное использование в условиях серийного производства.

Перевод материала в состояние текучести возможно также путем приложения соответствующих напряжений в плоскости листа при одновременном прижатии к оснастке. В этом случае практически нельзя исключить потерю устойчивости тонкого листа при сжатии напряжениями $\sigma_{сж}$ (см. рис. 1).

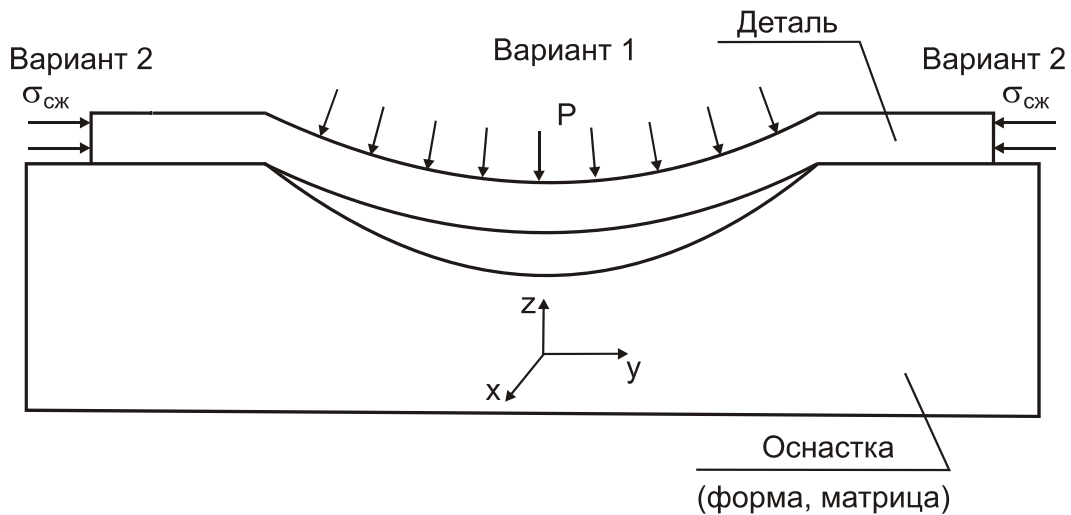


Рисунок 1 – Схема упругой калибровки

Таким образом, в рамках классических процессов пластического деформирования трудно обеспечить надлежащее качество формы деталей из тонкого листового материала. Вместе с тем из опыта стало известно, что при импульсном (высокодинамическом) нагружении обеспечивается калибровка формы и размеров деталей [2, 3] и тогда возникает вопрос о механизме деформирования, обеспечивающем состояние текучести материала при сравнительно невысоких энергозатратах.

Все импульсные методы формообразования (взрывная, электрогидравлическая, газодетонационная, магнитоимпульсная штамповка и др.) характеризуются тем, что в технологической среде (воздухе, воде, жидкости) со скоростью звука движется фронт давления, крутизна которого зависит от мощности источника (рис. 2).



Рисунок 2 – Схема движения и форма фронта волны давления при импульсном формообразовании

Из области динамического деформирования металлов известно, что при определенных условиях реализуется локализация сдвиговых деформаций [4], суть которой заключается в образовании очень узкой полосы сдвига (полосы адиабатического сдвига) в зоне приложения узкого импульсного давления. Локализация (сосредоточение) сдвиговой деформации в очень узкой зоне, ширина которой зависит от скорости удара, обеспечивает сохранение структуры металла и сокращает энергозатраты на выполнение технологических операций.

Сопоставление этих двух фактов с известным явлением калибровки при импульсной обработке позволяет объяснить механизм реализации текучести материала и соответственно требуемого изменения формы детали. Суть вскрытого механизма показана на рис. 3 и заключается в переводе металла в состояние текучести под действием сдвиговых напряжений, т.е. реализуется состояние

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = 0,$$

где τ , γ – соответственно сдвиговые напряжения и деформации.

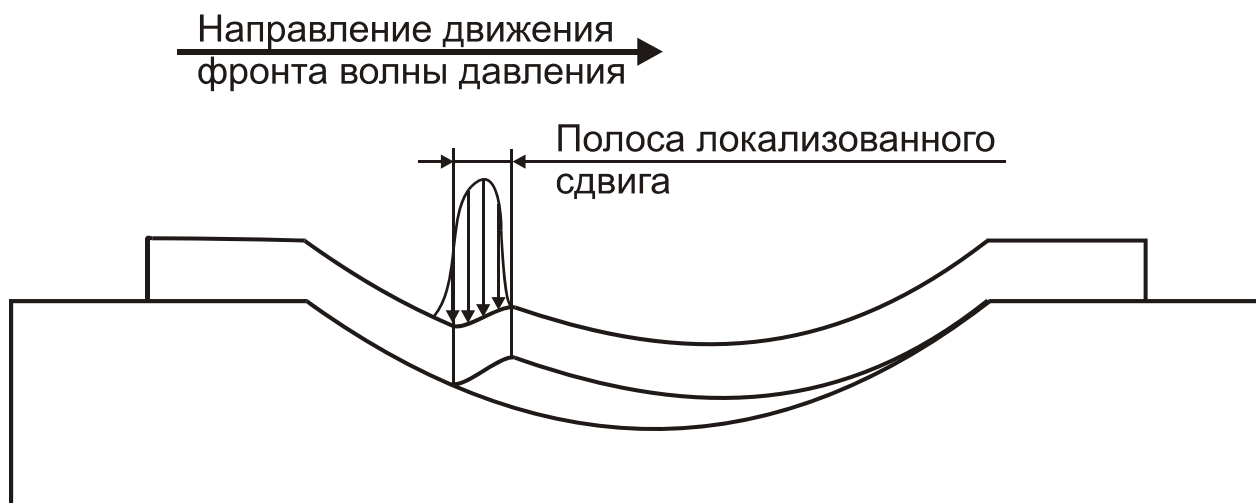


Рисунок 3 – Схема образования полосы локализованного сдвига

Из рис. 3 видно, что энергозатраты при таком способе деформирования металла значительно меньше из-за того, что энергия затрачивается на деформирование незначительного объема материала. Чем выше скорость движения фронта волны, равная скорости звука в передающей среде, и чем круче фронт, тем эффективней явление локализации сдвиговых деформаций.

Локализация пластической деформации возникает при изменении напряжения в зависимости от скорости и величины деформации, а также температуры. Считается, что тепло не успевает отводиться от полос адиабатического сдвига вследствие увеличения производительности дислокационных источников, а также более высокой скорости движения дислокаций по сравнению с их скоростью при статическом деформиро-

вании. Области локализации деформации шириной до нескольких десятков микрометров были обнаружены в различных металлах и сплавах [5 – 7]. Основными факторами, обуславливающими возникновение полосы адиабатического сдвига, являются [5]:

- уровень энергии дефекта упаковки: чем он выше, тем устойчивей появление локализованного сдвига; к материалам с высокой энергией дефекта упаковки относят алюминий, никель, титан [8];

- отсутствие препятствий на пути движения дислокаций (дислокационный «лес», мелкодисперсные частицы, высокоугловые границы зерен и т.п.), затрудняющие возврат дислокаций.

Дополнительным условием действия факторов, способствующих формированию полос адиабатического сдвига, является величина давления на фронте ударной волны.

Большинство исследований локализации пластической деформации при динамическом нагружении затрагивают такие технологические процессы, как сварка взрывом, импульсная резка, упрочнение. Такие процессы характеризуются высокой величиной действующего давления (≤ 150 ГПа) и высокой скоростью ударной волны ($\leq 1000 \dots 1500$ м/с), в то время как импульсная калибровка относится к технологическим процессам с более низкими параметрами ударного нагружения – величина действующего давления (≤ 5 ГПа) и скорость ударной волны (≤ 300 м/с). Существует ряд работ, в которых рассмотрены особенности развития локализованного сдвига при относительно невысоких скоростях динамического нагружения. Так, в работе [6] экспериментально подтверждено, что в образцах из титанового сплава полосы адиабатического сдвига образуются при скорости ударного нагружения 5 м/с, а в образце из высокопрочной стали развитие полос адиабатического сдвига наблюдается при скорости более 60 м/с. Локализация деформации в образцах из алюминиевого сплава АД1 имеет место при нагружении со скоростями 173, 350 и 900 м/с [5].

Выводы

На основе анализа экспериментальных фактов вскрыт механизм реализации текучести материала при импульсной калибровке, который заключается в переводе металла в состояние текучести под действием сдвиговых напряжений, т.е. при динамическом воздействии узкого фронта давления реализуется локализация сдвиговых деформаций текучести.

В связи с этим необходимо исследовать особенности развития локализованного сдвига, его зависимость от величины и интенсивности фронта давления и вопросы, связанные с энергетикой процесса импульсной калибровки тонкостенных листовых деталей после штамповки.

Список использованных источников

1. Рекомендации по технологичности конструкций авиационных и специальных двигателей [Текст] / под общ. ред. С.М. Лещенко. – М.: НИАТ, 1972. – 381 с.
2. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов [Текст] / В.Г. Степанов, И.А. Шавров. – Л.: Машиностроение, 1975. – 280 с.
3. Степанов, В.Г. Гидровзрывная штамповка элементов корпусных конструкций [Текст] / В.Г. Степанов, П.М. Синилин, Ю.С. Навагин. – Л.: Судостроение, 1966. – 291 с.
4. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов [Текст] / под ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мура. – М.: Metallургия, 1984. – 512 с.
5. Локализация пластической деформации при скоростном ударном деформировании алюминия и сплава АМг6 [Текст] / В.В. Астанин, Г.Н. Надеждин, Ю.Н. Петров и др. // Проблемы прочности. – 1987. – № 3. – С. 81 – 85.
6. Степанов, Г.В. Локализованный сдвиг в металлах при ударном нагружении [Текст] / Г.В. Степанов, В.А. Федорчук // Проблемы прочности. – 2000. – № 2. – С. 27 – 42.
7. Степанов, Г.В. Локализация деформации сдвига в металле при динамическом нагружении [Текст] / Г.В. Степанов // Проблемы прочности. – 1995. – № 8. – С. 52 – 59.
8. Эпштейн, Г.Н. Строение металлов, деформированных взрывом [Текст] / Г.Н. Эпштейн. – М.: Metallургия, 1980. – 256 с.

Поступила в редакцию 14.08.2014.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*