

УДК 621.7.04

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО МЕТОДА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛИ СРЕДСТВАМИ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ САЕ-СИСТЕМ

© Чеславская Агния Альбертовна, e-mail: chaa@yandex.ru;

Мироненко Владимир Витальевич, e-mail: mironenko_vv@istu.edu;

Колесников Алексей Владимирович, e-mail: avk@istu.edu;

Максименко Никита Владимирович, e-mail: socrat39@yandex.ru

Иркутский государственный технический университет. Россия, г. Иркутск

Котов Вячеслав Валерьевич, канд. техн. наук, e-mail: viacheslav.kotov@esi-group.com

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина. Россия, г. Екатеринбург

Статья поступила 04.12.2014 г.

Проанализирована возможность изготовления детали разными методами формообразования. Смоделировано появление дефектов и предложены методы их устранения. Сделан вывод о рациональном методе изготовления рассматриваемой детали.

Ключевые слова: пневмотермическая формовка листовых деталей; вытяжка на падающих молотах; эластоформование; вытяжка в жестких штампах.

Одной из актуальных задач в авиа- и машиностроении является поиск рационального метода формообразования листовых деталей. Решение по выбору метода формообразования принимается на основе опыта и знаний технолога, т.е. рациональность принимаемых решений зависит от человеческого фактора, что недопустимо в современном производстве. Рассмотрен виртуальный поиск рационального варианта изготовления детали с применением САЕ-систем.

Для анализа методов формообразования выбраны детали (рис. 1) сложной пространственной формы, с двойной кривизной, с двумя подсечками и бортами, направленными в одну сторону; материал детали – сплав АМг6, толщина – 0,8 мм.

Поиск рационального метода формообразования проводится в системе инженерного анализа для листовой штамповки RAM-STAMP 2G французской фирмы ESI Group.

Рассмотрим семь вариантов формообразования детали.

1. *Вытяжка на листоштамповочном молоте – самый распространенный процесс изготовления листовых деталей со сложной поверхностью.* В ходе

моделирования были приняты следующие допущения:

- не учитывается влияние скорости деформации на напряжения;
- ограничивающие подкладки моделируются свойствами модели материала Mooney–Rivlin;
- конец удара определяется ограничением хода пуансона;
- пластическая часть кривой течения задана через функцию Krupkowsky Law ($\sigma = K \cdot (\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$, где σ – текущий уровень напряжения; K – коэффициент прочности; ϵ_0, ϵ_p – начальный и текущий уровни пластической деформации; n – коэффициент упрочнения);
- для описания поверхности текучести выбраны модель Hill 48;
- исходная толщина заготовки взята 1 мм.

Сплав АМг6 имеет следующие физико-механические и технологические свойства: модуль Юнга – 64 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,333; плотность – $2,6 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³; коэффициенты анизотропии – $r_0 = 0,648$, $r_{45} = 0,566$, $r_{90} = 0,705$; постоянные функции Krupkowsky Law ($\epsilon_0 = 0,006541$, $K = 0,4744$, $n = 0,1993$) соответственно; деформационная способность материала – 25%; допустимое утонение – не более 20%.

Результаты моделирования процесса формообразования детали вытяжкой на листоштамповочном молоте за шесть ударов представлены в табл. 1. FLD-диаграмма (диаграмма предельного формования) показывает появление трещин, начиная с четвертого удара (табл. 2).

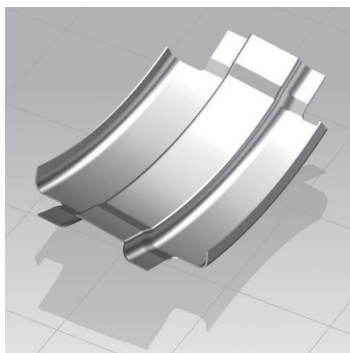


Рис. 1. Модель детали

Таблица 1. Результат моделирования после шестого удара вытяжки, вариант 1

	Распределение толщины	Распределение деформаций
Шестой удар		
	минимальная толщина 0,45 мм (красный цвет – утонение 55%)	максимальная деформация – 159% (красный цвет)

Таблица 2. FLD-диаграмма вытяжки, вариант 1

	FLD-диаграмма на заготовке	FLD-диаграмма в графическом виде
Шестой удар	<p>синие зоны – зоны образования трещин</p>	
	<p>Гофр, развивающийся за счет сжимающих тангенциальных напряжений, складывается в результате потери устойчивости. Синие зоны появляются на радиусных переходах в середине детали и в районе складки. На графике синие точки выходят далеко за пределы кривой, ограничивающей деформационные возможности материала</p>	

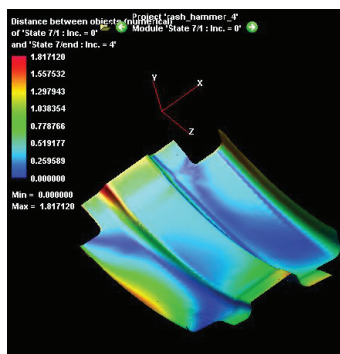


Рис. 2. Пружинение, возникающее в детали после вытяжки по варианту 2 (максимальное значение в красной зоне)

2. Вытяжка на листоштамповочном молоте с имитацией промежуточной термообработки. Для повышения деформационной способности материала в имеющуюся модель

добавлена имитация проведения промежуточной термообработки с помощью введения коэффициента 0,1 уменьшения напряжений и деформации после каждого удара. Результаты моделирования варианта формообразования 2 представлены в табл. 3 и 4. Предельные деформации и зоны трещин на FLD-диаграмме появляются на один удар позже, чем в предыдущей модели (на пятом, а не на четвертом ударе).

С учетом промежуточной термообработки рассчитано пружинение, возникающее в детали после формообразования, и оно составляет 1,81 мм (рис. 2).

3. Вытяжка детали в жестких штампах. Все допущения и модель материала остаются теми же, что и при моделировании вытяжки на ли-

Таблица 3. Результаты моделирования вытяжки, вариант 2

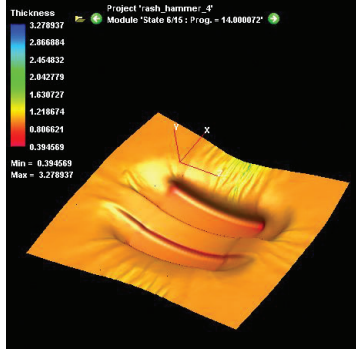
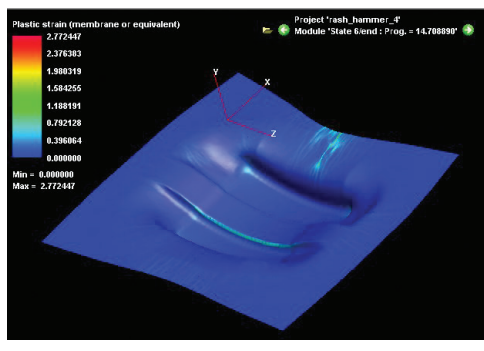
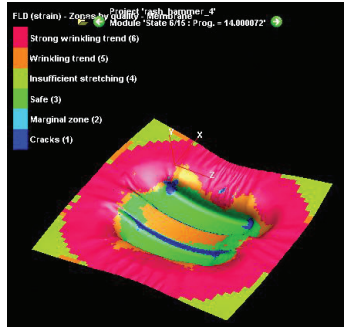
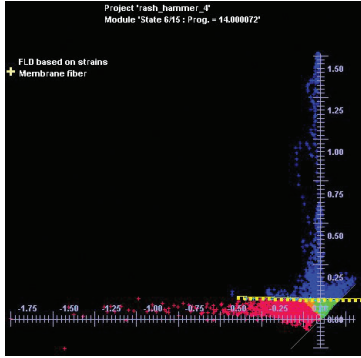
	Распределение толщины	Распределение деформаций
Шестой удар		
	минимальная толщина 0,39 мм (красный цвет – утонение 61%)	максимальная деформация 277 % (красный цвет)

Таблица 4. FLD-диаграмма вытяжки, вариант 2

	FLD-диаграмма на заготовке	FLD-диаграмма в графическом виде
Шестой удар		
	<p>синие зоны – области образования трещин</p> <p>Синие зоны появляются в районе складки, на радиусных переходах в середине детали и продолжают развиваться в края оснастки. На графике синие точки выходят далеко за пределы кривой, ограничивающей деформационные возможности материала</p>	

стоштамповочном молоте. Исходная толщина заготовки равна толщине детали – 0,8 мм.

Результаты моделирования формообразования детали вытяжкой в жестких штампах после шестого удара приведены в табл. 5 и 6.

4. *Процесс формообразования эластичной среды.* Все допущения и модель материала остаются теми же, что и при моделировании вытяжки на листоштамповочном молоте. Исходная толщина заготовки равна толщине детали – 0,8 мм.

При моделировании этого процесса формообразования получена развертка. К развертке добавлены припуски для размещения отверстий под шпильки для базирования заготовки на оснастке

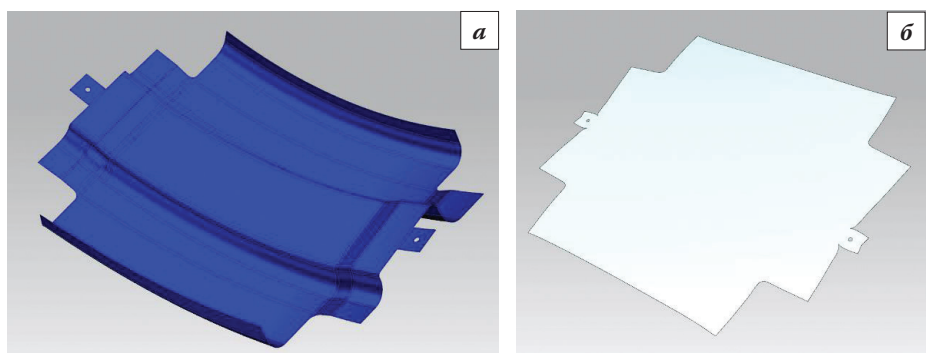


Рис. 3. Развертка, полученная в PAM-STAMP 2G: а – деталь с приливами под шпильчные отверстия; б – физическая развертка с учетом параметров материала

(рис. 3). При моделировании процесса получения развертки детали был использован обратный решатель Inverse программного комплекса PAM-STAMP 2G.

Формообразование детали осуществляется за три перехода: на первом формируется обводная кривизна, на втором – средний элемент с двумя подсечками, на третьем – борта. На рис. 4 пока-

Таблица 5. Результаты моделирования вытяжки, вариант 3

	Распределение толщины	Распределение деформаций
Ход пуансона 45 мм		
	минимальная толщина – 0,13 мм (красный цвет – утонение 83,75%)	максимальная деформация – 159% (красный цвет)

Таблица 6. FLD-диаграмма вытяжки, вариант 3

	FLD-диаграмма на заготовке	FLD-диаграмма в графическом виде
Ход пуансона 45 мм		
	<p>синие зоны – области образования трещин</p> <p>На радиусных переходах в середине детали появляются синие зоны. На графике синие точки уходят далеко за кривую, ограничивающую деформационные возможности материала</p>	

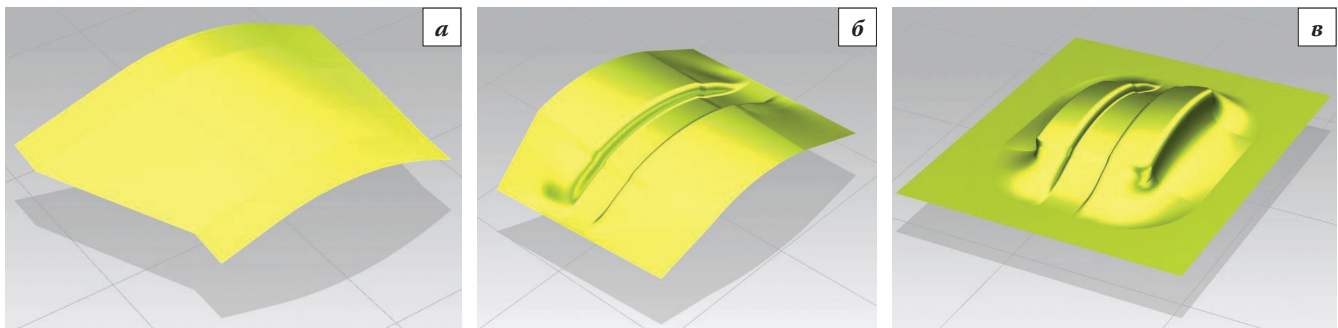


Рис. 4. Оснастка для формовки первого (а), второго (б) и третьего (в) переходов

заны рабочие поверхности оснастки для каждого перехода.

Результаты моделирования процесса представлены в табл. 7 и 8; на последнем переходе при формообразовании бортов образуются дефекты типа «складка».

5. Формовка эластичной средой с использованием складкодержателя. Для устранения дефекта, связанного с чрезмерной деформацией в районе перехода приливов со шпилечными отверстиями к заготовке, необходимо сделать его более плавным (рис. 5). Толщина заготовки 1 мм.

Таблица 7. Результаты моделирования формовки, вариант 4

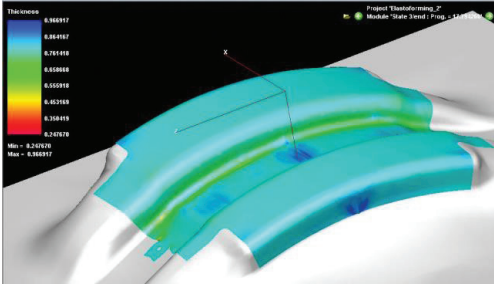
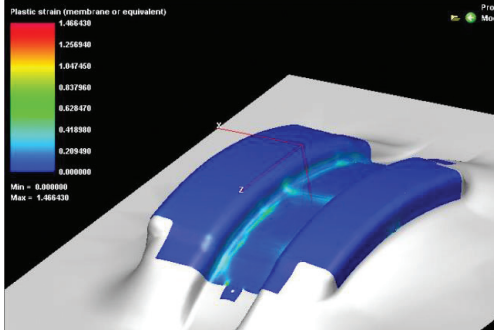
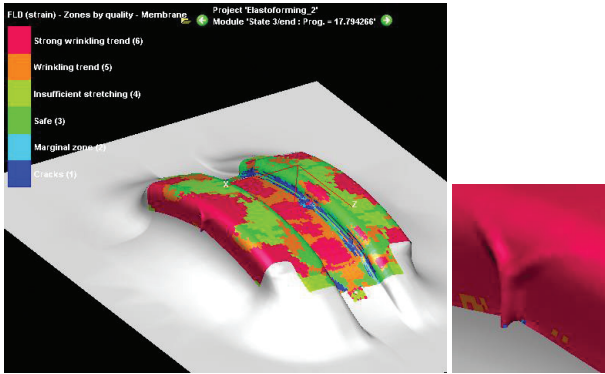
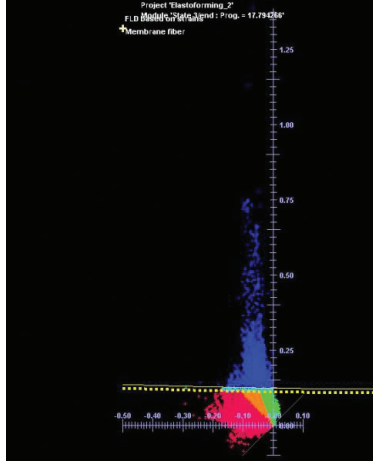
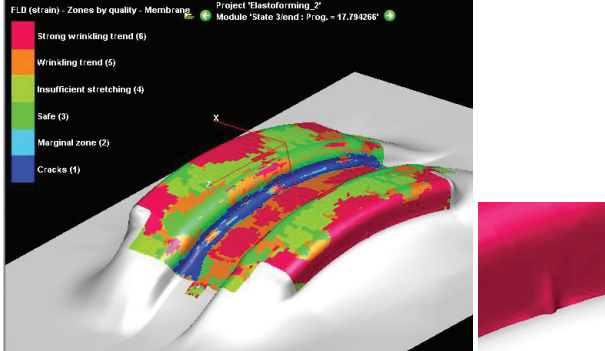
Распределение толщины		Распределение деформаций	
Третий переход			
	минимальная толщина 0,24 мм (красный цвет – утонение 70%)	максимальная деформация 146% (красный цвет)	

Таблица 8. FLD-диаграмма для формовки, вариант 4

FLD-диаграмма на заготовке		FLD-диаграмма в графическом виде	
Третий переход			
			
синие зоны – области образования трещин			
Синие зоны развиваются на радиусных переходах в середине детали и в месте резкого перехода прилива к заготовке. Красные зоны, отвечающие за складкообразование, развиваются на бортах. На графике синие точки уходят далеко за кривую, ограничивающую деформационные возможности материала			

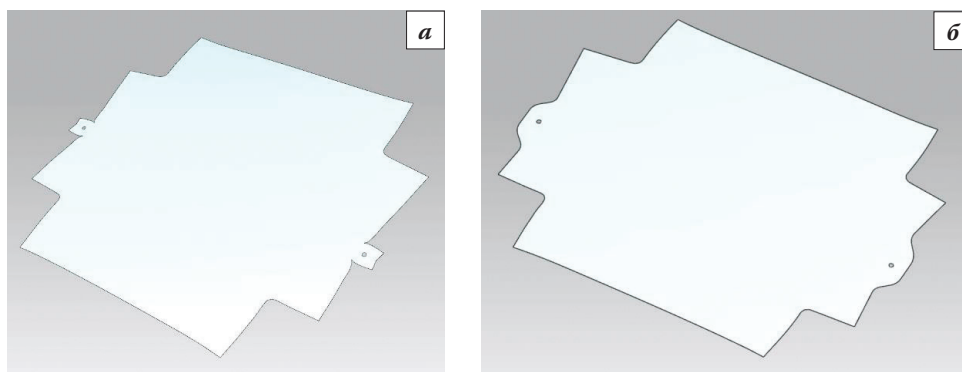


Рис. 5. Развертки с резкими (а) и плавными (б) переходами к приливам (для шпильчных отверстий)

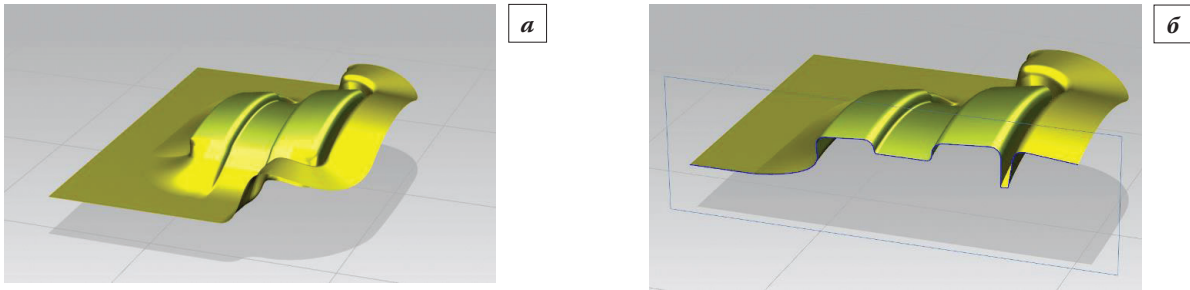


Рис. 6. Оснастка со складкодержателем (а) и оснастка со складкодержателем в разрезе (б)

Таблица 9. Результаты моделирования формовки, вариант 5

	Распределение толщины	Распределение деформаций
Третий переход	<p>минимальная толщина 0,6 мм (красный цвет – утонение 40%)</p>	<p>максимальная деформация 66% (красный цвет)</p>

Таблица 10. FLD-диаграмма, полученная при моделировании формовки, вариант 5

	FLD-диаграмма на заготовке	FLD-диаграмма в графическом виде
Третий переход		
	<p>Синие зоны развиваются на радиусных переходах в середине детали. На графике синие точки уходят далеко за пределы кривой, ограничивающей деформационные возможности материала</p>	

Для устранения складок на одном из бортов (где она особенно большая) в конструкцию оснастки добавлен складкодержатель (рис. 6). Складка второго борта устраняется наращиванием давления.

Результаты моделирования варианта 5 приведены в табл. 9 и 10.

Моделирование показало, что увеличение толщины и более плавные переходы от приливов к детали снизили утонение до 40%. В районах ра-

Таблица 11. Результаты моделирования формовки, вариант 6

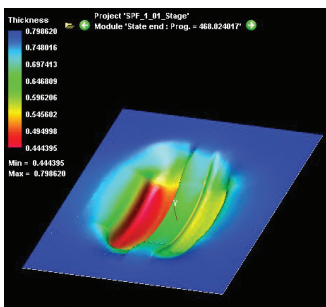
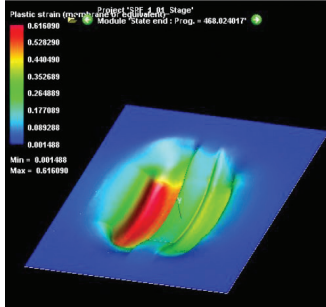
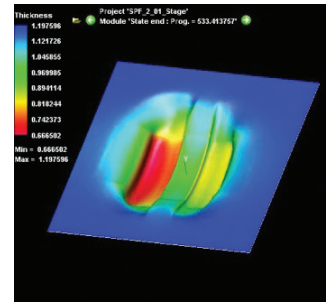
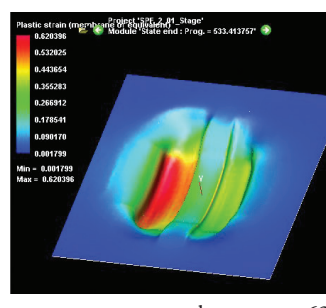
	Распределение толщины	Распределение деформаций
Время формовки – 468 с	 <p>минимальная толщина 0,44 мм (красный цвет – утонение 45%)</p>	 <p>максимальная деформация 61% (красный цвет)</p>

Таблица 12. Результаты моделирования, вариант 7

	Распределение толщины	Распределение деформаций
Время формовки – 533 с	 <p>минимальная толщина 0,66 мм (красный цвет – утонение 34%)</p>	 <p>максимальная деформация 62% (красный цвет)</p>

диусных переходов степень деформации сократилась до 66%, однако она существенно превышает допустимую. На последнем переходе при формообразовании бортов применение складкодержателя помогло устранить дефект типа «складка».

6. *Моделирование процесса формообразования пневмотермической формовкой в режиме сверхпластичности.* Принято допущение, что формообразование ведется только в результате утонения заготовки*. Исходная толщина заготов-

ки 0,8 мм. Максимальная деформационная способность материала АМг6 в состоянии сверхпластичности – 240%. Результаты моделирования приведены в табл. 11.

7. *Моделирование процесса формообразования пневмотермической формовкой в режиме сверхпластичности.* Для получения толщины детали после формовки, близкой к заданной, была увеличена толщина исходной заготовки до 1 мм. Моделирование показало, что утонение составило 34%, но минимальная толщина детали – 0,66 мм, что на 17,5% меньше заданной. Результаты моделирования процесса показаны в табл. 12.

Результаты моделирования семи вариантов процесса формообразования рассматриваемой детали представлены в табл. 13.

Анализируя результаты, видим, что варианты 1–5 неприемлемы для изготовления рассматриваемой детали в связи с образованием трещин в результате превышения допустимого значения деформации. Такую деталь возможно изготовить путем пневмотермической формовки в режиме сверхпластичности (варианты 6 и 7) со следующими показателями:

– деформации составляют 62% и не превышают деформационные возможности материала в этом состоянии, т.е. трещины отсутствуют;

Таблица 13. Результаты моделирования

Номер варианта	Деформация, %		Образование трещин	Утонение, %		Пружинение, мм	Образование складок
	допускаемая	требуемая		допускаемое	получаемое		
1	25	159	Да	20	55	–	Да
2	25	277	Да	20	61	1,81	Да
3	25	159	Да	20	83,75	2,9	Да
4	25	146	Да	20	70	–	Да
5	25	66	Да	20	40	4,3	Нет
6	240	61	Нет	–	45	0	Нет
7	240	62	Нет	–	34	0	Нет

*Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. М.: Ком Книга, 2005. 320 с.

- отсутствие пружинения после формообразования;
- отсутствие гофрообразования;
- наличие только одного комплекта оснастки;
- малое время изготовления детали.

Использование увеличенной толщины заготовки (вариант 7) позволило получить толщину детали 0,66 мм с отклонением в допусковых пределах 17,5%.

Заключение. С помощью предложенных моделей и способов оценки эффективности по разным параметрам показана возможность выбора наиболее рационального метода формообразования на этапе разработки технологического процесса изготовления детали и подготовки производства. Моделирование с использованием САЕ-систем позволяет оценить

эффективность метода по нескольким параметрам для каждой конкретной детали и снижает влияние человеческого фактора при выборе рационального варианта технологического процесса.

Работа проводится при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

CHOICE OF RATIONAL FORMING METHOD OF A DETAIL BY MEANS OF ENGINEERING ANALYSIS WITH USE OF CAE-SYSTEMS

© Cheslavskaya A.A.; Mironenko V.V.; Kolesnikov A.V.; Maksimenko N.V.; Kotov V.V., Cand. Sci. (Eng.)

The possibility of producing of parts by different methods of forming was analyzed. The occurrence of defects and suggest ways to handle them were simulated. The rational method of manufacturing the part in question was concluded.

Keywords: air thermo forming of sheet metal parts; drop-hammer drawing; rubber pad forming; rigid dies drawing.

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

На НКМЗ отметили 50-летие лаборатории валков и энергетического оборудования

На Новокраматорском машиностроительном заводе (г. Краматорск Донецкой обл.) отметили полувековой юбилей деятельности лаборатории валков и энергетического оборудования.

Первым руководителем этого научно-производственного подразделения предприятия был Виталий Лаврентьевич Пилюшенко, в будущем член-корреспондент НАНУ, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, Государственной премии Украины, Заслуженный деятель науки и техники Украины, академик Академии технологических наук Украины, академик Академии горных наук Украины, академик Академии экономических наук Украины, член Королевского общества материаловедов (Англия).

За полвека в лаборатории валков НКМЗ сформировалась собственная научная школа, позволившая предприятию стать равным среди лучших мировых производителей высокопрочных прокатных инструментов. В частности, НКМЗ является единственным на территории стран бывшего Союза обладателем технологии высококачественной дифференцированной термообработки сверхкрупных валков, позволяющей получить значения твердости рабочей поверхности бочки вала более 60 ед. по Шору и обеспечить глубину рабочего слоя от 90 до 110 см.

«На комплексную технологию производства прокатных валков, разработанную на НКМЗ, получены авторские свидетельства. Она позволяет конкурировать с ведущими западными фирмами, – утверждает начальник лаборатории А. Дардесов. – Диапазон стальных кованых валков широк – от рабочих валков холодной прокатки до особо крупных опорных валков массой до 150 т».

Сейчас НКМЗ является крупнейшим поставщиком оборудования прокатных станков более чем в 20 стран мира. За время деятельности предприятия изготовлено свыше 1 млн т прокатных валков различных типов.

Пресс-служба НКМЗ