

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ ОРЕБРЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Галкин В.И.<sup>1\*</sup>, Палтievич А.Р.<sup>1\*\*</sup>, Шелест А.Е.<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

<sup>2</sup> *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,  
ИМЕТ РАН, Ленинский проспект, 49, Москва, 119334, Россия*

\* e-mail: galkin@mati.ru

\*\* e-mail: a-paltievich@yandex.ru

\*\*\* e-mail: shelest99@mail.ru

Исследуются причины возникновения дефектов в оребренных панелях из алюминиевых сплавов при их изготовлении методом изотермической штамповки. Средствами конечно-элементного математического моделирования устанавливаются управляющие параметры процесса штамповки и характер их влияния на величину утяжины в готовом изделии. Полученные результаты обработаны по методике планирования трехфакторного эксперимента. Получен полином, связывающий размер утяжины в получаемой панели с исходными параметрами технологического процесса — температурой, скоростью деформирования и толщиной заготовки. Применение дисперсионного анализа позволяет определить значимые параметры в расчетном полиноме и значительно упростить его.

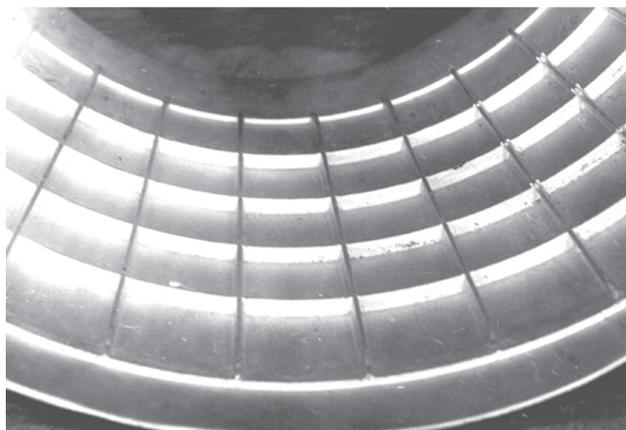
*Ключевые слова:* изотермическая штамповка, оребренные панели, математическое планирование эксперимента, трехфакторный дисперсионный анализ, функциональные зависимости, утяжина.

### Особенности изготовления оребренных панелей

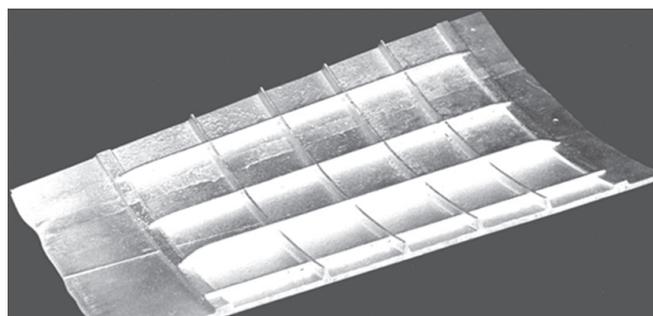
Одной из наиболее сложных проблем, которые стоят перед производителями авиационно-космической техники, является проблема обеспечения надлежащего качества изделий. Это в первую очередь относится к деталям ответственного назначения, обеспечивающим удовлетворение не только эксплуатационных характеристик самой детали, но

и отвечающим за надежность и долговечность всего авиационного или космического аппарата. Это утверждение справедливо и по отношению к производству авиационных оребренных панелей из алюминиевых сплавов (рис. 1), которые используются в качестве топливных баков (в том числе и вмонтированных в крыло авиационных аппаратов), силовых элементов, деталей фюзеляжа и т.д. [1].

Современные руководящие материалы (ГОСТы, ОСТы, ТУ, технологические рекомендации и т.д. [2, 3]) рассматривают процесс получения оребрен-



а)



б)

Рис. 1. Примеры фрагментов обечаек (а) и авиационных панелей (б) с продольно-поперечным оребрением

ных панелей из алюминиевых, титановых и магниевых сплавов, а также из ряда специальных сталей методами обработки металлов давлением (ОМД), только в том случае, когда средняя толщина ребра меньше или равна толщине полотна изделия с учетом припуска на механическую обработку на зеркальной (обратной) стороне полотна панели или обечайки. Согласно этим стандартам, панели с толщиной ребра больше толщины полотна панели не производятся методами горячей объемной штамповки. Изготовление панелей сложной формы, с толщиной ребра более толщины полотна панели, рекомендуется вести с применением других металлообрабатывающих методов: обработкой металлов резанием, электрохимическим фрезерованием и т.д. Однако использование этих методов в промышленных масштабах сопровождается высокой трудоемкостью процесса и значительными отходами металла. В то же время процессы ОМД позволяют получать оребренные панели за один ход исполнительного инструмента при минимальных отходах металла на последующую механообработку [4, 5].

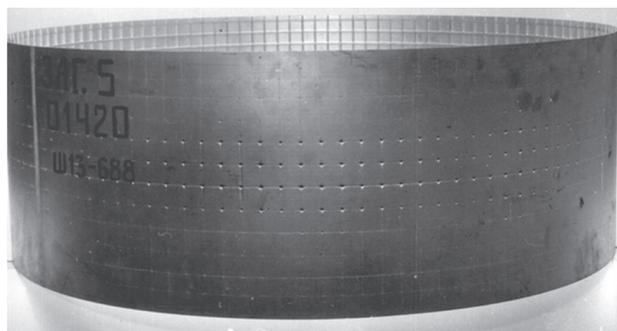
В случае изготовления оребренных панелей с большой площадью поверхности и, как следствие, со значительными потребными усилиями деформирования наиболее целесообразно использовать метод горячей изотермической штамповки, протекающей в условиях сверхпластичности. Следует отметить, что использование изотермической штамповки не лишено недостатков — при изготовлении

сложнооребранных панелей методами ОМД в теле изделия возможно появление дефектов: утяжина на обратной стороне полотна панели (рис. 2). Ранее проведенные исследования [6] показали, что образование утяжины является следствием наличия встречных потоков металла при пластическом заполнении ребра панели (рис. 3), что в условиях сверхпластичности при изотермической штамповке значительно увеличивает склонность процесса к утяжинообразованию.

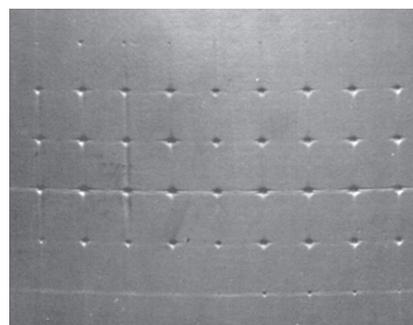
Для изделий ответственного назначения и деталей, работающих под нагрузкой, появление таких дефектов недопустимо, так как они являются концентраторами напряжений и причиной появления трещин в теле изделия и его разрушения.

Один из способов борьбы с утяжиной — дополнительный припуск на толщину панели, который после штамповки удаляется механической обработкой вместе с образовавшейся утяжиной. Однако отсутствие установленных количественных взаимосвязей между параметрами технологического процесса, такими как скорость деформирования, температура и начальная толщина заготовки, и их влиянием на величину утяжины приводит к назначению припуска заведомо большей величины, а это отрицательно сказывается на количестве отходов в стружку.

Таким образом, установление функциональных зависимостей, связывающих управляющие параметры технологического процесса изотермической



а)



б)

Рис. 2. Дефекты в виде утяжин штампованных алюминиевых обечайек (а) и панелей (б) с продольно-поперечным оребрением

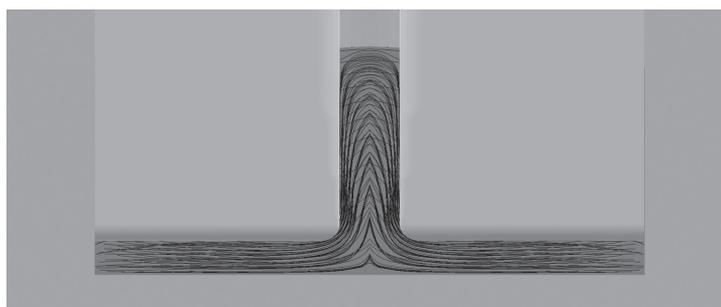


Рис. 3. Механизм формирования ребра панели

штамповки с величиной утяжины при изготовлении оребренных панелей, является одной из основных проблем в технологии получения авиационных панелей и обечаек с толщиной ребра больше толщины полотна панели и целью данной работы.

### Методика проведения исследований

В данной работе изучается процесс изотермической штамповки перекрестно оребренной панели с высотой ребра 5 мм, шириной 1,75 мм и толщиной основания (подложки) 1 мм из сплава 01420. Основными управляющими параметрами процесса являются температура, скорость и толщина заготовки, определяющие величину утяжины или ее отсутствие.

Исследование процесса пластического формоизменения велось с использованием конечно-элементного программного пакета QForm. Результатами расчета в QForm являются характер течения и поля распределения температур, напряжений, деформаций и других расчетных данных по объему пластически деформируемого металла. Полученные данные [8-10] характеризуют напряженно-деформируемое состояние в получаемом изделии при выбранных исходных параметрах процесса, т.е. это расчеты в некоторой точке эксперимента. Поэтому, несмотря на высокую точность конечно-элементного анализа, его использование в случае поисковых задач сопряжено с рядом сложностей. При исследовании характера влияния на результаты расчета нескольких параметров приходится выполнять значительное число расчетов, что крайне затратно по времени. Но и большой объем расчетных данных не дает полного представления о характере взаимосвязи между исследуемыми параметрами в тех их значениях, где моделирование не проводилось. В то же время функциональные зависимости, связывающие расчетные параметры, дают возможность численно определить их значения на всем протяжении интервала изменений.

Для нахождения искомым функциональных зависимостей для расчета глубины утяжины от технологических параметров процесса и толщины заготовки в работе применен метод математического планирования эксперимента [7].

На этапе конечно-элементного анализа определялись границы интервалов изменения исследуемых величин: температуры, скорости деформации и толщины заготовки, затем строилась матрица планирования эксперимента, в соответствии с которой осуществлялось моделирование с исходными параметрами, определенными данной матрицей. Обработка результатов расчета проводилась по центральному трехфакторному композиционному плану.

### Математическое моделирование и планирование эксперимента

В результате моделирования течения металла в условиях изотермической штамповки установлено, что вытесняемый в центральную зону металл испытывает большие сжимающие напряжения, вследствие чего в области отсутствия подпора со стороны штамповой оснастки возможна потеря устойчивости ребра. Данное явление довольно широко наблюдается при моделировании изотермической штамповки панелей с относительно низкими и толстыми ребрами, в условиях течения металла с двух сторон.

На основе математического моделирования характера течения металла при формировании ребра двухсторонним потоком металла установлены три возможных механизма формирования ребра (рис. 4):

- механизм формирования ребра панели выдавливанием металла;
- механизм формирования ребра, сопровождаемого отрывом металла от подреберной стороны штампа с образованием утяжины в подреберной части готового изделия;
- механизм формирования ребра с двойной потерей устойчивости.

Причем переход от одного механизма формирования ребра, сопровождаемого получением бездефектного изделия, к другому механизму, в результате которого получается неисправляемый брак, в большой степени зависти от температурно-скоростных условий деформирования и толщины исходной плоской заготовки.

Результаты моделирования с различными исходными значениями температуры, скорости деформирования и исходной толщиной заготовки показали, что при толщинах исходной заготовки более 2,75 мм существуют варианты, когда утяжина не распространяется на зону чистового изделия. При толщине заготовки менее 2,5 мм независимо от других параметров технологического процесса утяжина всегда затрагивает чистовое изделие.

Результаты расчета с выбранными исходными параметрами представлены на рис. 5 и 6. Анализ данных показывает, что варьирование значениями скоростей и температур также приводит к изменению утяжины  $S_{ут}$  в зоне чистового изделия.

Таким образом, предварительные результаты математического моделирования позволили определить интервалы изменения выбранных управляющих параметров технологического процесса, при которых их влияние на величину утяжины максимально (табл. 1).

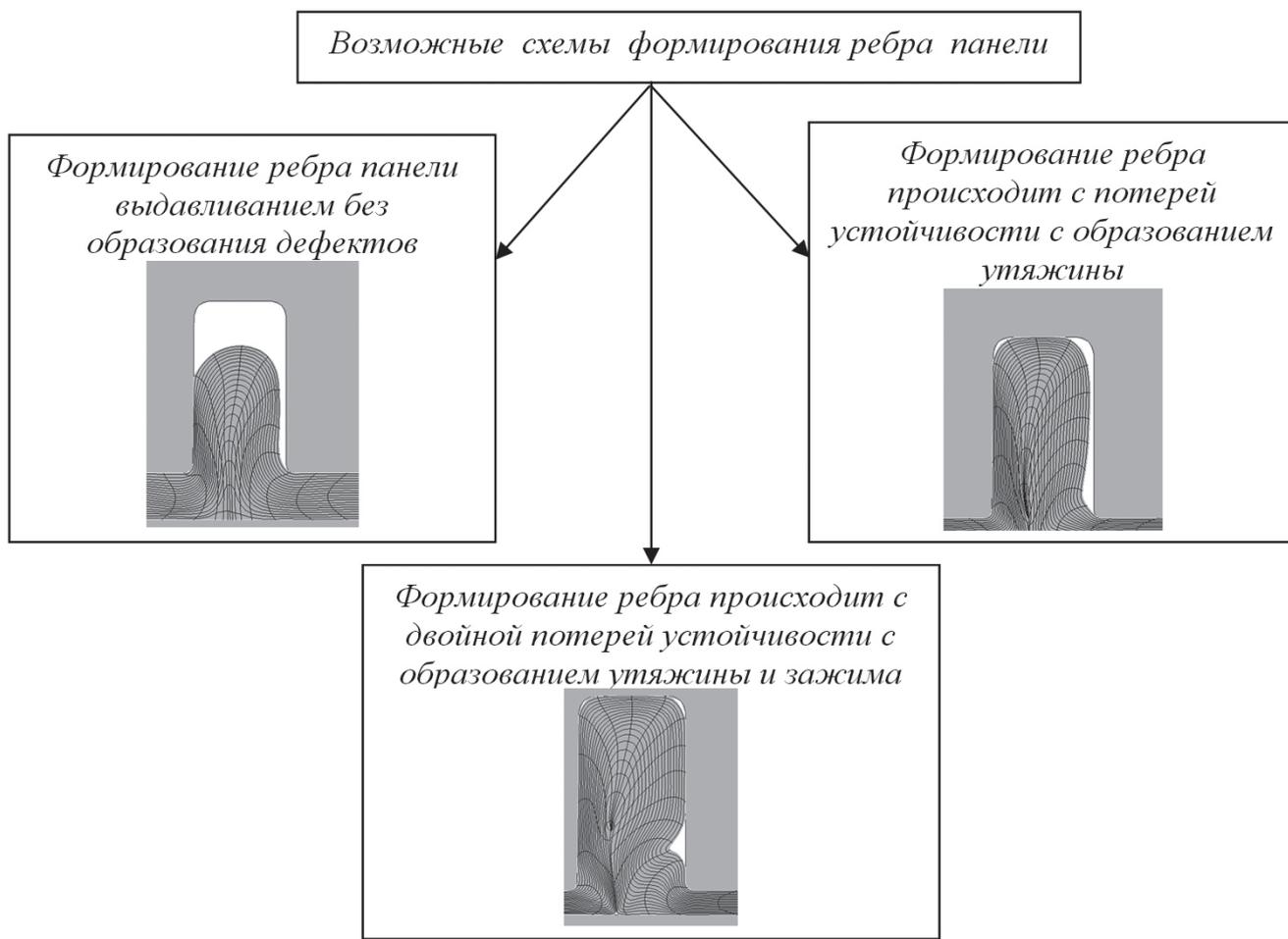


Рис. 4. Классификация возможных механизмов формирования ребра

Диапазон изменения параметров технологического процесса изотермической штамповки оребренной панели

Параметр	Диапазон изменений
Толщина заготовки $S$ , мм	2,5-2,75
Температура процесса $T$ , °C	320-360
Скорость деформирования $V$ , мм/с	0,04-0,2

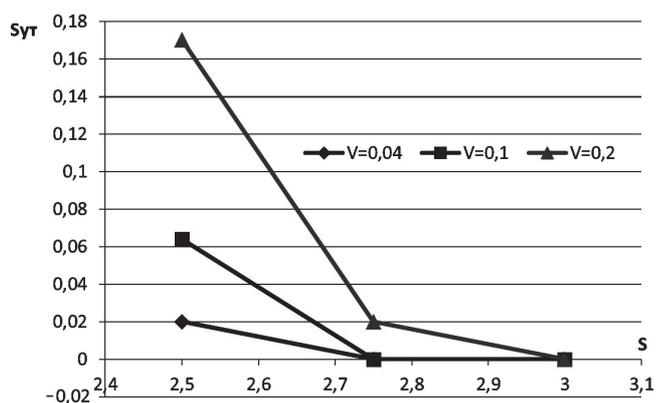
Таблица 1

В дальнейшем, согласно методике активного эксперимента, с помощью построенной конечно-элементной модели проведено 15 расчетов, 8 из которых — для линейной серии, при значениях параметров, соответствующих точкам  $-1$  и  $+1$  (табл. 2). Один расчет проведен в центре эксперимента и шесть — в «звездных точках». Третья серия проводилась по рототабельному плану, для которого, в случае трехфакторного эксперимента, «звездные точки» равны  $-1,68$  и  $1,68$ .

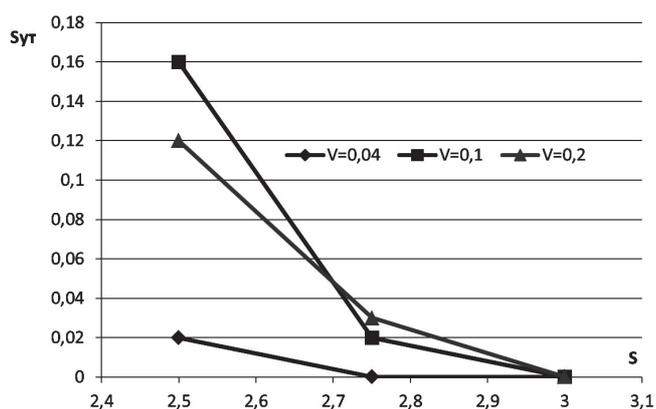
Таблица 2

Варьируемые параметры модели

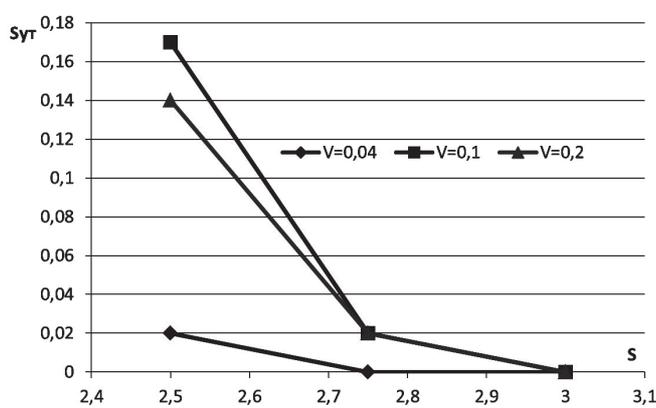
№	Название параметра	Обозначение	Значения параметров в узловых точках эксперимента				
			-1,68	-1	0	1	1,68
1	Температура штамповки, °C	$T$	320,00	328,10	340,00	351,90	360,00
2	Скорость деформирования, мм/с	$V$	0,04	0,07	0,12	0,17	0,20
3	Толщина заготовки, мм	$S$	2,50	2,55	2,63	2,70	2,75



a)



б)



в)

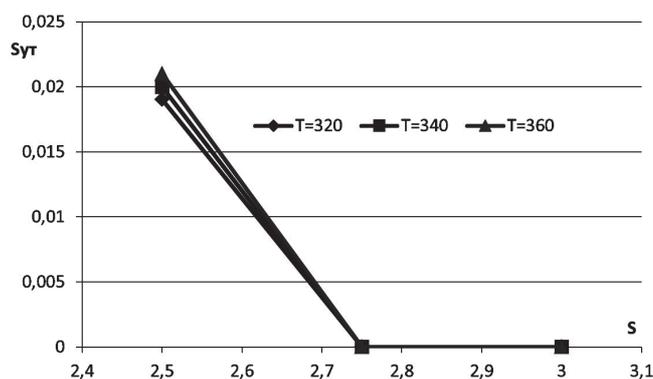
Рис. 5. Зависимость утяжины  $S_{yt}$  в чистовом изделии от скорости деформации  $V$  и исходной толщины заготовки  $S$  при 320°C (а), 340°C (б), 360°C (в)

После обработки результатов получено расчетное уравнение-полином:

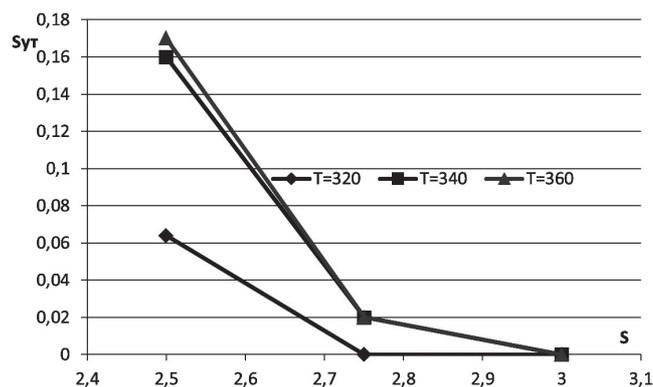
$$S_{yt} = 0,052 - 0,0075T - 0,0475S - 0,0124V + 0,01TS + 0,005TV + 0,01SV + 0,0075TSV + 0,018T^2 + 0,013S^2 + 0,006V^2.$$

Расчетные значения по полиному показали хорошую сходимость с результатами моделирования (рис. 7).

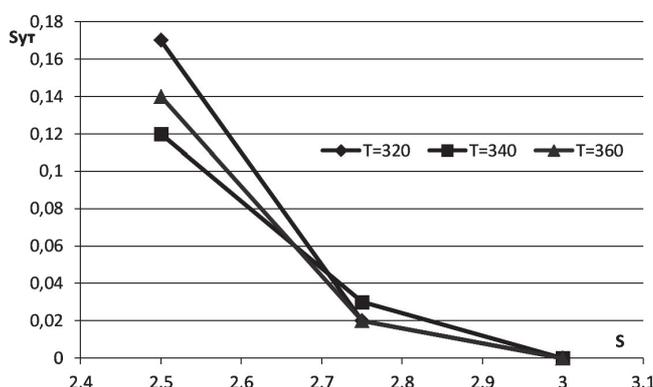
Полученный полином содержит 10 комбинаций исследуемых параметров технологического процес-



a)



б)



в)

Рис. 6. Зависимость утяжины  $S_{yt}$  в чистовом изделии от температуры  $T$  и исходной толщины заготовки  $S$  при скорости  $V$ , равной 0,04 мм/с (а), 0,1 мм/с (б), 0,2 мм/с (в)

са. Очевидно, что их вклад в расчетную величину утяжины неравнозначен. Использование дисперсионного анализа позволяет определить значимые параметры в расчетном полиноме и по возможности упростить его написание.

Проведенный дисперсионный анализ показал, что наименее значимыми являются параметры  $TS$ ,  $TV$ ,  $SV$  и  $TSV$ . Таким образом, исходный полином может быть преобразован к виду:

$$S_{yt} = 0,052 - 0,0075T - 0,0475S - 0,0124V + 0,018T^2 + 0,013S^2 + 0,006V^2.$$

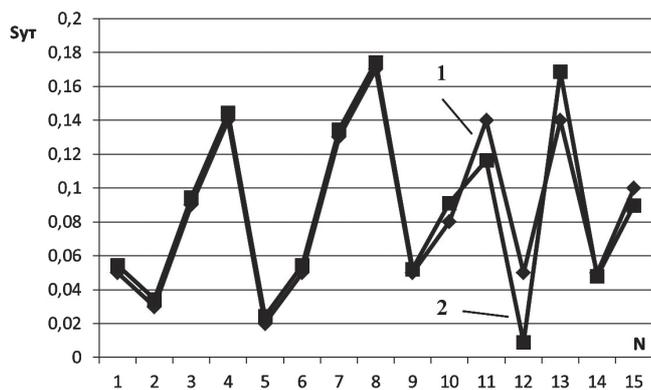


Рис. 7. Значения утяжины  $S_{yt}$ , полученные в результате моделирования (1) и расчета по уравнению-полиному (2)

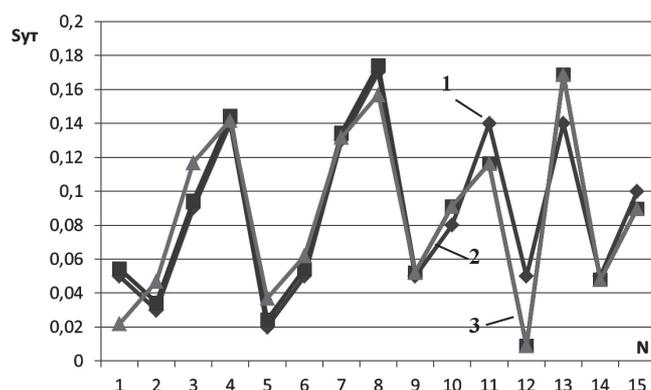


Рис. 8. Расчет величины утяжины  $S_{yt}$  по результатам моделирования(1), в исходном (2) и упрощенном (3) полиноме

Расчетные значения утяжины по упрощенному полиному также показывают высокую корреляцию с результатами моделирования (рис. 8).

Для подтверждения результатов математического моделирования проводились эксперименты по изготовлению элементарных ячеек авиационных панелей из сплава 01420 изотермической штамповки.

**Проверка результатов моделирования экспериментальными исследованиями**

Штамповка производилась в термокомпрессионной установке с использованием специально изготовленной оснастки (рис. 9 и 10).

Образцы подготавливались следующим образом: сначала из горячекатаной полосы вырезались прямоугольные заготовки, затем из заготовок механической обработкой изготавливались круглые образцы стандартного размера, обеспечивающего свободную установку исследуемого образца в матрицу (рис. 11).

Далее оснастка вместе с образцами помещалась в термокомпрессионную установку и нагревалась до необходимой температуры, после чего начинался процесс деформации по заданным температурно-скоростным режимам.

В соответствии с ранее определенной полиномиальной зависимостью получены начальные зна-

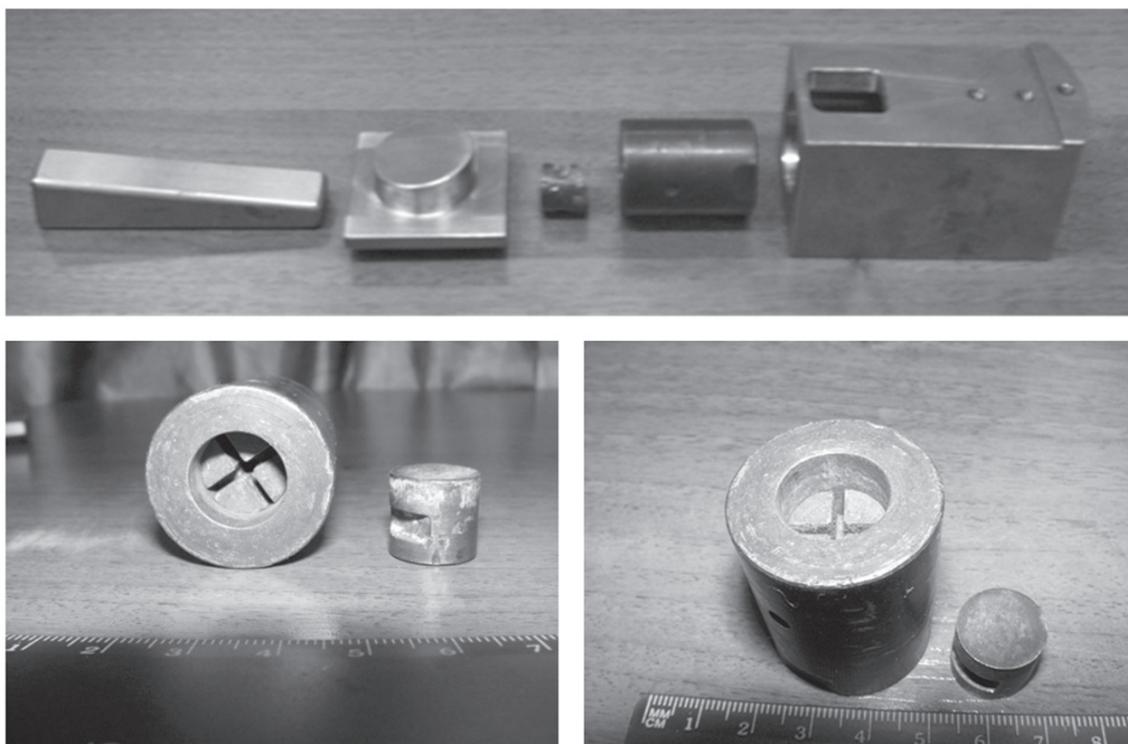


Рис. 9. Элементы оснастки

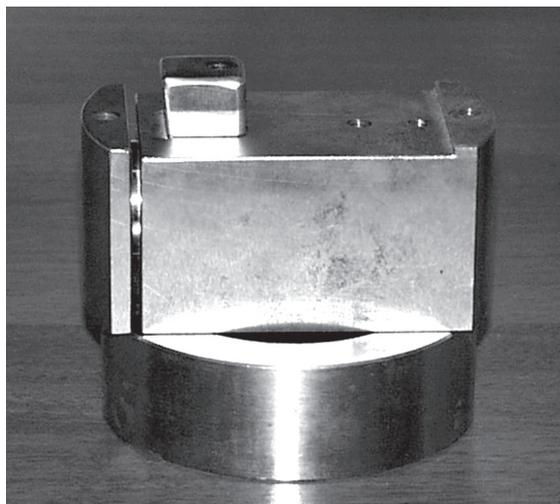
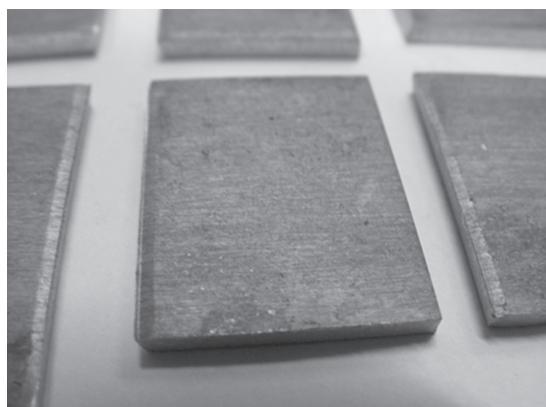


Рис. 10. Оснастка в сборе



а)



б)

Рис. 11. Исходные заготовки (а) и образцы для деформирования (б) из алюминиевого сплава 01420

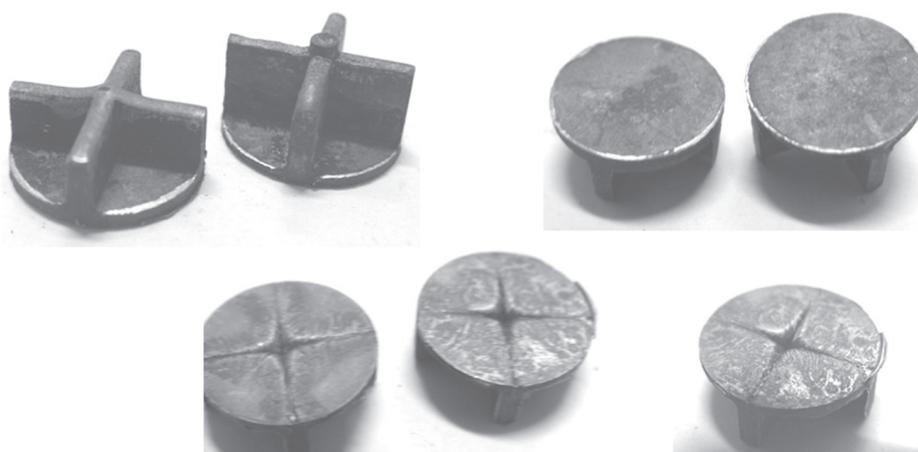


Рис. 12. Деформированные образцы из сплава 01420

чения технологического процесса, обеспечивающие получение как бездефектного изделия, так и с дефектом в виде утяжины в чистой зоне.

На рис.12 представлены полученные изделия как без дефектов, так и с наличием утяжины на гладкой поверхности панели.

Полученные образцы показали высокую сходимость результатов математического моделирования, регрессионного анализа и реального эксперимента. Величина утяжины в деформированных образцах хорошо коррелируется со значениями, полученными расчетным путем, — погрешность не превышает 10—15%.

### Выводы

Эффективное управление технологическим процессом должно основываться на установлении взаимосвязи между его исходными параметрами и получаемыми результатами. Результаты исследования возможности управления горячей изотермической штамповкой оребренных панелей показали, что функциональные зависимости, связывающие величину утяжины с управляющими параметрами процесса, позволяют исключить в готовом изделии распространение утяжины на зону чистового изделия и тем самым обеспечить минимальный припуск на механическую обработку.

Современным подходом к построению функциональной зависимости при решении многофакторной задачи является метод математического планирования эксперимента. Решение задачи было сведено к построению матрицы планирования трехфакторного эксперимента, моделированию 15 вариантов технологического процесса и обработке полученных результатов, где в итоге получено искомое уравнение-полином.

## Библиографический список

1. Меснянкин С.Ю. К вопросу выбора оптимальных значений по тепловому контактированию конструктивных элементов авиационных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 85-90.
2. РТМ 1.4.1644 — 86. Изотермическая объемная штамповка алюминиевых и магниевых сплавов. — М.: НИАТ, 1987. — 134 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия / Гл. ред. К.В. Фролов. — М.: Машиностроение, 1996. Т. III-2. Технологии заготовительных производств. — 736 с.
4. Жаров М.В. Технологии производства оребренных авиационных панелей сложной формы // Технология машиностроения. 2006. № 8. С. 31-33.
5. Яковлев С.С., Чудин В.Н., Черняев А.В., Перепелкин А.А. Изотермическое выдавливание и сварка оребренных давлением в режиме кратковременной ползучести // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 1. С. 52-60.
6. Петров А.П., Паршиков А.Н., Жаров М.В. Особенности образования дефектов при изотермической штамповке оребренных изделий // Цветные металлы. 2003. № 5. С. 66-70.
7. Горленко О.А., Можяева Т.П., Проскурин А.С. Метод анализа полных факторных экспериментов // Методы менеджмента качества. 2009. № 3. С. 44-48.
8. Петров А.П., Галкин В.И., Палтievич А.Р. Особенности применения конечно-элементного анализа процессов обработки металлов давлением и перспективы прогнозирования структуры и свойств изделий // Технология машиностроения. 2007. № 9. С. 12-14.
9. Галкин В.И., Палтievич А.Р., Паршиков А.Н., Соколов А.В. Практика применения математического моделирования при решении технологических задач обработки металлов давлением // Технология легких сплавов. 2000. №1. С. 34-40.
10. Галкин В.И., Жаров М.В., Паршиков А.Н. Математическое моделирование характера течения металла при формировании панелей с оребрением методом изотермической штамповки // Научные труды МАТИ. 2001. С. 24-31.

## MODELING AND EVALUATION OF DEFECTS OCCURRENCE REASONS WHILE ISOTHERMAL PUNCHING OF RIBBED PANELS FROM ALUMINUM ALLOYS

Galkin V.I.<sup>1\*</sup>, Paltievich A.R.<sup>1\*\*</sup>, Shelest A.E.<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University),

MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

<sup>2</sup> Baikova Institute of Metallurgy and Materials Science Russian Academy of Sciences,

49, Leninsky prospect, Moscow, 119334, Russia

\* e-mail: galkin@mati.ru

\*\* e-mail: a-paltievich@yandex.ru

\*\*\* e-mail: shelest99@mail.ru

### Abstract

Ribbed panels from aluminum alloys are widely used in aircraft industry as power structural elements, parts of the wing and fuel tanks, as well as in the form of the heat-exchange surfaces. Increased requirements on strength and reliability are rendered to such panels. The most rational technique for such kind of panel manufacturing, i. e. isothermal punching, may lead to clipping in the ribs and sink marks on the side, opposite to the ribbing.

Modeling and experimental results of the studies reveal that defects stems from the combination of manufacturing process control parameters, such as temperature and deformation velocity, as well as geometrics, i. e. blank thickness.

The main objective of the studies consists in developing design technique of the part blank design as

a function of temperature and deformation velocity while isothermal punching.

The put forward problem is solved by control polynom development, linking manufacturing process parameters - the blank temperature, velocity and geometrics with the defect magnitude, i. e. sink marks in the ribbed aluminum panel while its manufacturing by isothermal punching technique.

The initial data for the required polynomial is the results of finite element mathematical modeling with varying initial parameters of the punching process and the magnitude of the forming sink mark or its absence.

The obtained modeling results were processed according to the three-way analysis of variance planning procedure. The regression equation was obtained to compute the sink mark magnitude in the ribbed panel

in dependence of the process temperature and velocity, as well as the initial blank thickness.

The authors applied the analysis of variance, which allowed define the significant factors in the calculated polynomial, and, neglecting the rest, significantly simplify it.

The sink mark magnitude obtained with the calculated polynomial correlated well with the results of mathematical modeling and experimental studies.

The proposed method is universal and can be implemented for various cases of defect-free technological processes design, when evaluating the impact of the process's control parameters on and their contribution to the manufactured product's characteristic being studied is required.

**Keywords:** isothermal stamping, ribbed panels, mathematical planning of the experiment, three-way analysis of variance, functional dependencies, sink mark.

## References

1. Mesnyankin S. Yu. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 85-90.
2. *Izotermicheskaya ob"emnaya shtampovka alyuminievyykh i magnievyykh splavov. RTM 1.4.1644 – 86* (Isothermal volumetric punching of aluminum and magnesium alloys. RTM 1.4.1644 – 86), Moscow, NIAT, 1987, 134 p.
3. Frolov K.V. *Mashinostroenie* (Mechanical engineering), Moscow, Mashinostroenie, 1996, vol. III-2, 736 p.
4. Zharov M.V. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2006, no. 8, pp. 31-33.
5. Yakovlev S.S., Chudin V.N., Chernyaev A.V., Perepelkin A.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 1, pp. 52-60.
6. Petrov A.P., Parshikov A.N., Zharov M.V. *Tsvetnye metally*, 2003, no. 5, pp. 66-70.
7. Gorlenko O.A., Mozhaeva T.P., Proskurin A.S. *Metody menedzhmenta kachestva*, 2009, no. 3, pp. 44-48.
8. Petrov A.P., Galkin V.I., Paltievich A.R. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2007, no. 9, pp. 12–14.
9. Galkin V.I., Paltievich A.R., Parshikov A.N., Sokolov A.V. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2000, no. 1, pp. 34-40.
10. Galkin V.I., Zharov M.V., Parshikov A.N. *Nauchnye trudy MATI*, Moscow, 2001, pp. 24-31.