



Министерство образования и науки РФ
Союз машиностроителей России
АО «Ульяновский НИАТ»
ФГБОУ ВПО Ульяновский государственный технический университет
Кафедра «Материаловедение и обработка металлов давлением»
Кафедра «Технологии заготовительно-штамповочного производства»

«Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России»

Материалы VII Всероссийской научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки

Сборник научных трудов

Ульяновск
2022



The Ministry of education and science
of the Russian Federation
Russian engineering union
PC «Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology
and Production Organization»
Ulyanovsk State Technical University
Department of Material Sciences and Fabricating Technology
Department "technology of blanking-die forging"

**«Science, theory and practice of the aviation industry
cluster of modern Russia»**

Proceedings of the VII scientific and production conference
dedicated to the Day of Russian science

Collection of proceedings

Ulyanovsk
2022

Министерство образования и науки РФ

Союз машиностроителей России

АО «Ульяновский НИАТ»

ФГБОУ ВПО Ульяновский государственный технический университет

Кафедра «Материаловедение и обработка металлов давлением»

Кафедра «Технологии заготовительно-штамповочного производства»

**«Наука, теория, практика авиационно-
промышленного кластера современной России»**

Материалы VII Всероссийской научно-производственной
конференции, приуроченной ко Дню Российской науки

Сборник научных трудов

Ульяновск

2022

УДК 629.7:658(082)
ББК 39.5+30.6я43
Н 34

Редколлегия: Ярушкина Н. Г.;
Марковцев В. А.;
Марковцева В. В. (ответственный секретарь)

Н 34 **Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России.** Материалы VII Всероссийской научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки (г. Ульяновск, 2022 г.) : сборник научных трудов [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Ульяновск: УлГТУ, 2022. – 148 с.

ISBN 978-5-9795-2218-0

В сборник вошли тезисы докладов, представленных на VII Всероссийской научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки «Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и моделирование технологических процессов в авиационной и других отраслях промышленности», проводимой АО «Ульяновский НИАТ» и УлГТУ.

Статьи печатаются в авторской редакции.

УДК 629.7:658(082)
ББК 39.5+30.6я43

ISBN 978-5-9795-2218-0

© Коллектив авторов, 2022
© Оформление. УлГТУ, 2022

Состав организационно-программного комитета

Ярушкина Н. Г.	Председатель, ректор Ульяновского государственного технического университета, д.т.н., профессор
Марковцев В. А.	Сопредседатель, генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ», зав. каф. «Технологии заготовительно-штамповочного производства», д.т.н.
Войт А.В.	Председатель Ульяновского регионального отделения ООО «Союз Машиностроителей России»
Рыжаков С. Г.	Директор Ульяновского филиала ПАО «Туполев»
Кокорин В. Н.	Зав.каф. «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ, д.т.н., профессор
Гречников Ф.В.	Зав. каф. «Обработка металлов давлением» Самарского НИУ им. академика С.П.Королева (г.Самара), академик РАН, профессор, д.т.н.
Филимонов В. И.	Профессор кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ, д.т.н.
Марковцева В.В.	Ответственный секретарь Конференции, н.с. АО «Ульяновский НИАТ», к.т.н.

Уважаемые коллеги!

VII ежегодная научно-производственная конференция «Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и упрочения технологической оснастки в авиационной и других отраслях промышленности», приуроченная ко Дню Российской науки, стала традиционной. Организаторы УРО Союз машиностроителей России, АО «Ульяновский НИАТ», базовая кафедра «Технологии заготовительно-штамповочного производства» (УлГТУ – АО «Ульяновский НИАТ»), кафедра «Материаловедение и ОМД» УлГТУ в текущем году приняли решение проводить данный научный форум в заочном режиме. В 2022 году содержание конференции представлено докладами заочной работы четырех секций: «Заготовительно-штамповочное производство в машиностроении», «Инженерный анализ и автоматизация», «Подготовка производства», «Гуманитарные науки в авиационно-космических технологиях».

Оргкомитет выражает благодарность всем авторам, принявшим участие в данной научно-производственной конференции, и надеется на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

Оргкомитет конференции

Секция 1

«Заготовительно-штамповочное производство в машиностроении»

УДК 621.981

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТЕЛЛАЖНОЙ СТОЙКИ ДЛЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЦЕХОВ В АВИАСТРОЕНИИ

Марковцев В.А.¹, Илюшкин М.В.², Марковцева В.В.³,
Филимонов В.И.⁴

1 – генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ», д.т.н.,

2 – зам. генерального директора АО «Ульяновский НИАТ», к.т.н.,

3 – научный сотрудник АО «Ульяновский НИАТ», к.т.н.,

4 – ВНС АО «Ульяновский НИАТ», д.т.н., профессор

Аннотация: Показаны подходы к разработке технологии производства профиля «стойка» для стеллажных систем в авиастроении при жёстких ограничениях на утонение стенок изделия. Рассмотрен альтернативный подход к созданию технологии на базе метода интенсивного деформирования в случае снятия жёстких ограничений на изменение толщины стенок профиля.

Ключевые слова: метод интенсивного деформирования, профилирование в валках, число переходов, стойка, утонение материала, рифт, перфорация, цинковое покрытие.

MANUFACTURING TECHNIQUE OF RACK UPRIGHT FOR BLANKING SHOPS IN AIRCRAFT INDUSTRY

Markovtsev V.A.¹, Pushkin M.V.², Markovtseva V.V.³, Filimonov V.I.⁴

1 – director general of the «Ulyanovsky NIAT»,

2 – JSC, d.t.s., vice director general of the «Ulyanovsky NIAT», JSC, k.t.s.,

3 – researcher of the «Ulyanovsky NIAT», JSC, k.t.s.,

4 – senior researcher of the «Ulyanovsky NIAT», JSC, d.t.s., professor

Abstract: There are shown approaches to develop manufacturing technique of rack upright for stocker systems in aircraft industry, when tight allowances are applied to profile wall thickness. There was shown another alternative approach based on intensive deformation method, when the profile wall thickness allowance is looser.

Key words: intensive deformation method, roll-forming, number of steps, upright, material thickening, raffle, perforation, zinc coating.

Заготовительные цеха авиастроительных предприятий используют большое количество технологического оснащения, хранимого на модульных стеллажных конструкциях разветвленного складского хозяйства. Такие современные конструкции (рис. 1) включают стойки, поперечные траверсы-балки с зацепами и распорки в виде незамкнутой прямоугольной трубы (гнутой профиль из оцинкованной стали).

Основным элементом таких конструкций является перфорированная стойка 110x77x2 мм из оцинкованной стали, которая изготавливается в традиционном профилировании [1] не менее, чем за 22 – 24 перехода. Разработка новой технологии на основе метода интенсивного деформирования (МИД) базируется на использовании компактного и менее энергоёмкого оборудования [2], рассчитанного на изготовление того же профиля за 16 – 18 переходов. Проблемы формовки указанного профиля практически не возникают при допуске утонения стенок профиля до 0,2 мм. Однако для рассматриваемой технологии утонение по условиям технического задания не должно превышать 0,1 мм.

Цель публикации – рассмотрение проблем профилирования, возникающих при разработке технологии производства профиля «стойка» на основе метода интенсивного деформирования при жёстких ограничениях на утонение элементов профиля при его изготовлении.

Формовку профиля с нормированным утонением (рис. 2) осложняет наличие:

- глубоких донных рифтов, зоны изгиба которых подвержены интенсивному утонению;
- отверстий прямоугольной формы на элементах указанных рифтов, подверженных искажениям формы;
- краевых отбортовок, повышающих

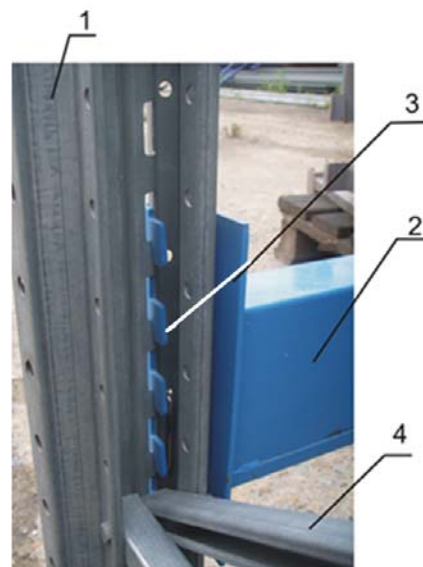


Рис. 1. Конструкция стеллажа: 1 – стойка; 2 – балка; 3 – зацепы стыкового фланца балки; 4 – распорка

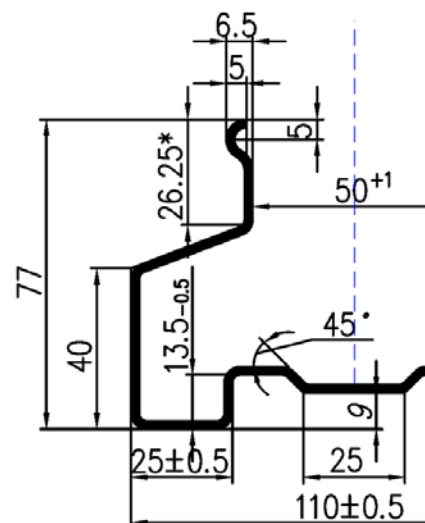


Рис. 2. Чертёж «стойки»

жѐсткость полок и требующих высвобождения в калибрах;

– цинкового покрытия, имеющего склонность к повреждению при больших контактуых напряжениях между инструментом и заготовкой.

Создание технологии на основе МИД предусматривает ряд этапов: оценка технологичности конструкции и изготовления профиля, определение базового элемента, оси профилирования, числа переходов и профилировочного станка, разработка схем формообразования, окончательный выбор оборудования, проектирование и изготовление технологического оснащения, отладка и запуск технологии в производство.

Анализ технологичности показал, что формовка профиля возможна в горизонтальных валках без использования вспомогательных средств технологического оснащения (межклетьевых проводок). Ввиду симметрии профиля, базовым элементом следует принять срединный горизонтальный участок рифта в донной части профиля, а ось профилирования проходит через его среднюю линию и вертикальную плоскость, делящую заготовку на две симметричных части. Расчѐт числа переходов и параметров профилировочного станка представлен на рис. 3 программой, выполненной в среде MathCad2001Pro. Программа включает в качестве исходных данных сведения о профиле (материал и геометрия сечения), требуемой точности профиля и ряд вспомогательных данных, присущих технологии МИД [3]. В тело программы помещены упрощѐнные модели для расчѐтов, а выходные данные сгруппированы в едином блоке. Расчѐтные данные и характеристики подходящего серийно выпускаемого профилегибочного станка разработки и изготовления АО «Ульяновский НИАТ» представлены для наглядности и сравнения в табл. 1. Сравнение значений основных параметров подтверждает полную пригодность профилегибочного станка для формовки данного профиля по мощности и характеристикам клеток.

Разработка схемы формообразования представляет достаточно ответственный этап при создании технологии, посредством которого

решаются вопросы обеспечения качества гнутого профиля. Была разработана программа экспериментальных исследований процесса формообразования профиля, которая предусматривала изучение (табл. 3): 1) формовки прямоугольного рифта 30S-7S и трапециевидного рифта 16S-2S; 2) формовки дуговой отбортовки R3; 3) деформации отверстий; 4. поведения цинкового покрытия при формообразовании.

Number of steps and RFM parameters calculation

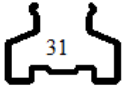
Blank data	Profile data	Quality data	Technodata	RFM data
$\sigma S := 200$	$n := 14$		$\beta := 2.7$	$L := 400$
$\sigma B := 260$	$W := 326$	$k := 11$	$e := 20$	$\xi := 20$
$s := 2.0$	$H := 77.0$	$T := 0.2$	$m := 20$	$v := 20$
	$B := 110$		$h := 20$	$\chi := 200$
	$\alpha l := 90$		$\tau := 140$	$R := 100$
$\phi := \frac{\pi}{2} \cdot n$	$\alpha r := 90$		$\gamma := 1.5$	 110x77,0x10x1,5
$\alpha m := \frac{(\alpha l + \alpha r)}{2}$		$f(s) := 0.136 \cdot s^{-0.44}$	$b := \frac{W - B}{2}$	
Program body				
Number of steps(2)				
$N(B, W, H, n, L, s, \beta) := \frac{H}{L \cdot \beta} \cdot \sqrt[3]{\frac{W \cdot n}{B}} \cdot \sqrt{\frac{s}{k \cdot T}} \cdot \frac{\sigma S}{\sigma B} \cdot \alpha m$				$N(B, W, H, n, L, s, \beta) = 16.292$
Forming power(4-7)				
$Pf := \frac{\sigma S \cdot s^2 \cdot v \cdot \phi}{240}$	$Pi := \chi \cdot N(B, W, H, n, L, s, \beta)$		$Pglob := \frac{Pf}{f(s)} + Pi$	
Axle length (8) $l := W + 2 \cdot e + m + h$				
Inter-axle distance (10)		$da := d + \gamma \cdot H + \xi$	Axle diameter (9)	
Inter-stand distance (11)			$d := \sqrt[3]{\frac{\sigma S \cdot s^2 \cdot R \cdot \phi}{1.6 \cdot f(s) \cdot \tau}}$	
		$\theta := \frac{\alpha m}{N(B, W, H, n, L, s, \beta) \cdot 57.3}$	$be := b$	
Output data				
Number of steps		$round(N(B, W, H, n, L, s, \beta)) = 16$		
Machine power, kW		$\frac{Pglob}{1000} = 17.883$		
Axle length, mm		$l = 406$		
Axle dia, mm		$d = 42.789$		
Interaxle distance		$da = 178.289$		
Iterstand distance		$Lp = 402.397$		

Рис. 3. Расчёт числа переходов и параметров станка

При одновременной формовке всех указанных элементов по схемам 1) и 2) было установлено, что формовку отбортовки следует отнести в конец

процесса из-за изменения конфигурации самой отбортовки и повышения жёсткости полки, что затрудняет боковую утяжку материала заготовки для обеспечения формовки рифта [4].

В схеме 1 за первый переход формируется рифт 16S-2S, а затем – рифт 30S-7S (за четыре перехода с постепенной подгибкой полок), что приводит к утонению в зоне изгиба «А» до 0,5 мм.

Схема 2, в которой на четвертом переходе совмещали подгибку с обжимом в надежде уменьшить утонение в зонах «А» и «В». Однако осадка заготовки вызвала утонение заготовки до 0,9 мм вместо предполагаемого утолщения из-за переформовки заготовки непосредственно перед её осадкой. При этом стенки отверстий имели небольшие трещины по толщине металла.

Таблица 1. Данные расчёта и параметры подходящего станка

Расчётные данные на основе рис. 3	Значение	Профилегибочный станок ГПС-500М16	
		Паспортные данные станка	Значение
Число переходов	16	Число клетей	16
Потребная мощность для формовки профиля, кВт	18	Установленная мощность (2 двигателя 4А160S6УЗ по 11 кВт каждый, 1000 об/мин), кВт	22
Длина валов, мм	40 6	Длина валов, мм	500
Диаметр валов, мм	43	Диаметр валов, мм	65
Межосевое расстояние, мм	17 8	Межосевое расстояние между валами с оснасткой (мах), мм	205
Межклетьевое расстояние, мм	40 2	Расстояние между профилирующими клетями, мм	394
–	–	Скорость профилирования, м/мин	до 10
–	–	Толщина заготовки (мах), мм	2,5

Третья схема напоминает первую схему, однако “разгруженную” (уменьшением углов подгибки), с формовкой рифта 16S-2S за один (первый) переход и последующей формовкой рифта 30S-7S за восемь переходов. Это приводило к утонению в зонах изгиба до 0,3 мм, что в три раза превышает допустимое утонение.

Таблица 2. Очередность формовки элементов профиля

	Очередность формовки			Особенности и номер схемы формообразования
	1 очередь	2 очередь	3 очередь	
-2	Рифт 30S-7S-рифт 16S-2S-отбортовка	–	–	Схемы 1 и 2 – одновременная формовка всех элементов
	Рифт 16S-2S	Рифт 30S-7S	Отбортовка	Схема 3
	Рифт 30S-7S	Рифт 16S-2S	Отбортовка	Схема 4
	Рифт 30S-7S-рифт 16S-2S	Отбортовка	–	Модифицированная схема 4 с различными параметрами заготовки

В **четвертой** схеме формообразования было предложено выполнять формовку рифта 30S-7S из дугообразной заготовки, сформованной за первые три перехода. На двух последующих переходах формовка происходила с боковой утяжкой полок, а на следующих двух переходах формовался рифт 16S-2S обжимом участка с поперечной кривизной. Затем осуществлялась формовка периферийных элементов жёсткости. Утонение заготовки в зонах изгиба не превышало 0,1 мм, однако возникала деформация отверстий (рис. 4, а-б) и дефекты покрытия (рис. 5,а). В рамках четвёртой схемы изучали влияние кривизны участков заготовки по её ширине от перехода к переходу на возникновение дефектов покрытия, деформацию отверстий и утонение.

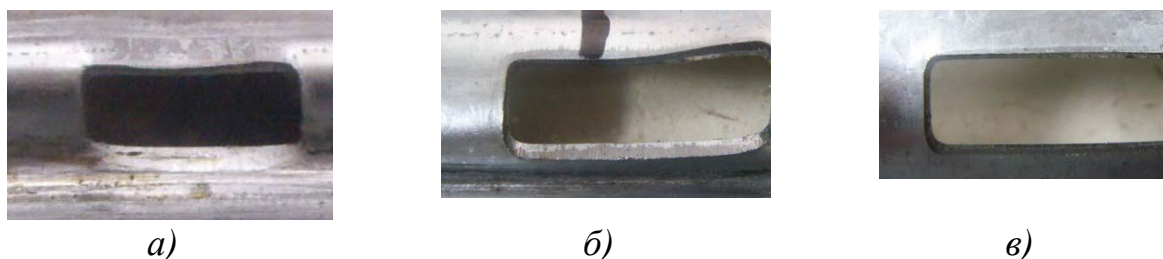


Рис. 4. Искажённые отверстия (а, б) и качественное отверстие (в)

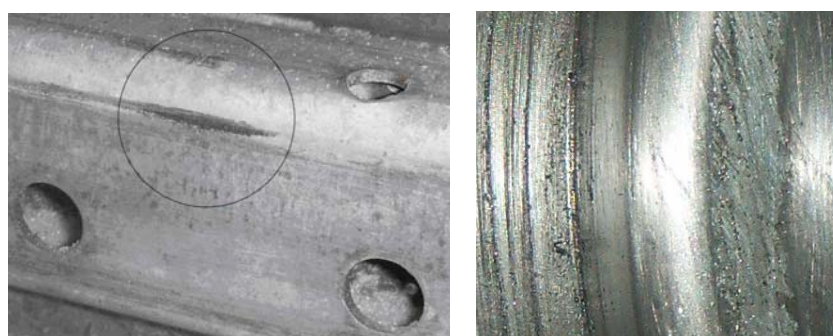


Рис. 5. Снятие цинкового покрытия с заготовки (слева) и налипание цинка на валок (справа)

Опуская подробности исследования, укажем, что были установлены приемлемые режимы формовки, сведённые в табл. 3. Указанные режимы создают достаточно «мягкую» схему формовки, которая позволяет избежать деформации отверстий в профиле и снижает уровень контактных напряжений между инструментом и заготовкой (применение смазки обязательно). Дуговая отбортовка, формируемая на средних переходах, не оказывает влияния на уже сформованные рифты. Что касается утонения заготовки, то и в этом случае удалось достичь удовлетворительных результатов, представленных ниже на рис. 6.

Таблица 3. Режимы формовки рифтов в донной части профиля

Этап	Описание процесса	Режим формовки
Формовка «двугорбого» рифта за четыре	Увеличение высоты «двугорбого» рифта по переходам	Высота рифта: 7-14-21-28 мм
	Переменный радиус инструмента для плавной перетяжки металла	Радиусы инструмента: 80-40-20-14 мм

перехода	Формовка участка под рифт 16S-2S за три перехода	Высота участка: 2-4-6-6 мм
	Излишек металла под формовку вертикальных стенок	Излишек металла: 3,4 мм на сторону
Формовка рифтов 30S-7S и 16S-2S за три перехода осадкой «двугорбого» рифта	Постепенное уменьшение высоты «двугорбого» рифта	Высота рифта: 22-18-13,5 мм
	Осадка с оформлением угловых зон рифта 30S-7S	Радиус инструмента: 8-5-2 мм
	Формовка и обжим рифта 16S-2S в шестом переходе; седьмой – калибрующий (окончательный обжим)	Формовка в размер по чертежу. Обжимы: 1,4 мм и 2 мм (в переходах 6 и 7)

Изменение толщины заготовки по зонам:

- в первых четырех переходах при плавной перетяжке металла по большим радиусам происходит постепенное утонение металла на 0,03 и 0,04 мм в зонах «А» и «В» соответственно. Постепенная осадка в следующих двух переходах приводит к дополнительному утонению на 0,02 мм, а осадка участка с излишком металла в седьмом переходе вызывает набор металла в угловой зоне.

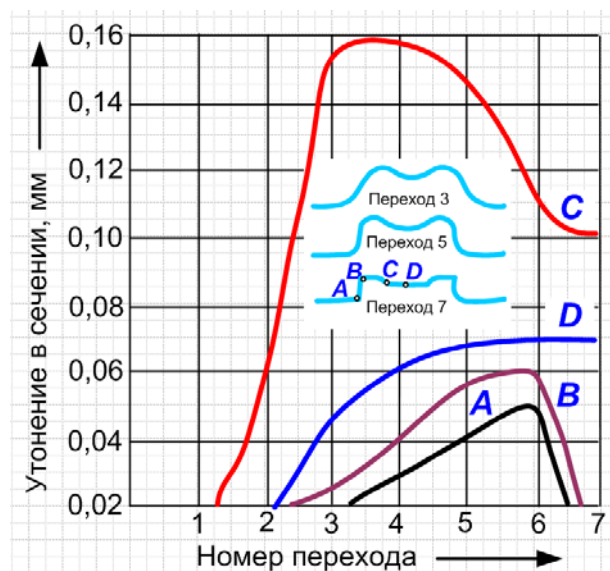


Рис. 6. Утонение по углам заготовки

- в центре рифта (зона «D») на первых пяти переходах происходит постепенное утонение от 0,01 до 0,07 мм, а осадка в шестом и седьмом переходах не меняет последней величины.

- в зоне «С» утонение достигает 0,16 мм за первые четыре перехода (схема растяжения в сопряжении радиусов будущих рифтов 30S-7S и 16S-2S). Осадка элементов рифта на последующих переходах приводит к

некоторому набору материала по толщине так, что суммарное утонение составляет 0,1 мм.

В целом, утонение по зонам рифта не превышает 0,1 мм, что соответствует требованиям заказчика технологии. Столь жесткие ограничения связаны с эксплуатационной нагрузкой профиля в стеллажной конструкции, которая приходится на угловые зоны рифтов. Последующее изучение упрочнения заготовки в зонах, примыкающих к отверстиям, и предельных испытаний стоек на несущую способность показало, что утонение до 0,25 мм в зонах рифта практически не ухудшает несущую способность профилей. Впоследствии, перед тиражированием технологии, была выполнена модификация схемы формообразования. Во вновь разработанной схеме формообразования (рис. 7) сохранено число переходов при чисто параллельной формовке элементов профиля.



Рис. 7. Параллельная схема формовки

Максимальное утонение в зонах рифтов при этой схеме не превышало 0,2 мм при приемлемом уровне других составляющих качества профиля

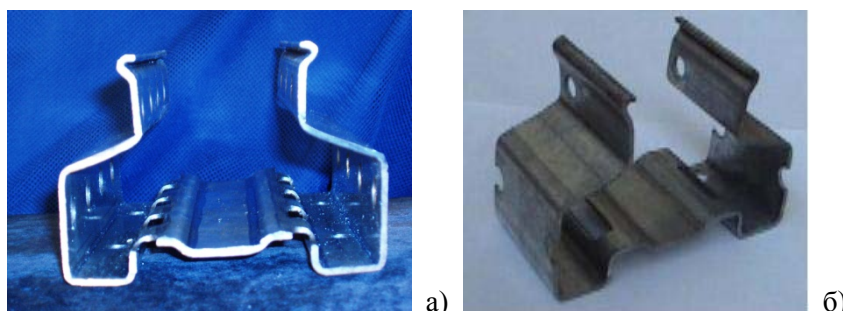


Рис. 8. Профиль с утонением до 0,1 мм, полученный по первоначальной схеме формовки (а); профиль с утонением до 0,2 мм, полученный по параллельной схеме формовки (б)

(форма отбортовок, размеры и форма отверстий, качество поверхности). При

этом формовка осуществлялась только в горизонтальных валках без межклетевых проводок, существенно упростилась настройка режимов, повысилась стабильность процесса формообразования. Образцы профилей, изготовленных по двум описанным технологиям, представлены на рис. 8. В заключение отметим, что данный профиль может применяться не только для стеллажных конструкций, но и для возведения навесов, пристроен к зданиям, укрытий, конструкций под рекламные щиты и многого другого [3]. Технологии производства профиля «стойка» по обоим вариантам реализованы и работают на площадях заказчиков, а сами изделия можно увидеть на авиастроительных и машиностроительных производствах, а также в многочисленных торговых центрах и складских помещениях.

Библиографический список

1. Roll Forming Handbook / Ed. by G.T. Halmos. Boca Raton: CRC Press. 2006. 583 p.
2. Марковцев В.А., Марковцева В.В., Филимонов В.И. Производство гнутых профилей для авиационных конструкций. Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 438 с.
3. Марковцева В.В. Совершенствование технологии производства гнутых профилей из листовых металлических заготовок с различными видами покрытий для авиационной и других отраслей промышленности. Дис. канд. техн. наук: 05.02.09 и 05.07.02. Самара: СГАУ, 2019. – 170 с.
4. Марковцев В.А., Илюшкин М.В., Филимонов В.И. Отработка технологии изготовления в роликах профиля «Стойка» // Производство проката, 2009, № 2. – С. 32 – 38.

УДК 629.7.002:621.981

ПРАВКА В РОЛИКАХ ПРЕССОВАННЫХ И ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Марковцев В. А.¹, Попов А. Г.², Карпов А. В.³

1 – д.т.н. генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ»

2 – к.т.н., генеральный директор ООО «Авиапрофиль»

3 – начальник ЗШП Филиала ПАО «Ил» - Авиастар

Аннотация. Представлены основные виды дефектов прессованных и гнутых профилей из алюминиевых сплавов, которые наиболее часто встречаются в заготовительно-штамповочном производстве Филиале ПАО «Ил» - Авиастар. Предлагается эффективная технология интенсивного деформирования профилей гибкой-прокаткой в роликах для устранения дефектов с минимальными трудозатратами. Внедрение данной технологии исключает правку на растяжных гидравлических прессов, снижает расход материалов на технологические припуски.

Ключевые слова. Прессованные и гнутые профили, алюминиевый сплав, гибка-прока, ролики, правка растяжением, продольный изгиб, скручивание, плакирующий слой.

EDITING IN THE ROLLERS OF PRESSED AND BENT PROFILES MADE OF ALUMINUM ALLOYS

Markovtsev V. A.¹, Popov A. G.², Karpov A. V.³

1 – associate Professor, Candidate of Technical Sciences, kaf. "Materials Science and OMD" UISTU, Ulyanovsk

2 – General Director, Doctor of Technical Sciences of JSC "Ulyanovsk NIAT", Head of the Department "Technologies of ZSHP" UISTU, Ulyanovsk

3 – Head of procurement and stamping production of the Branch of PJSC "Il" - Aviastar, Ulyanovsk

Abstract. The main types of pressed and bent profiles made of aluminum alloys defects, which are most often found in the procurement and stamping production of the Branch of PJSC "Il" - Aviastar, are presented. An effective technology of profiles intensive deformation by flexible rolling in rollers is proposed to eliminate defects with minimal labor costs. The introduction of this technology eliminates the straightening of tensile hydraulic presses, reduces the consumption of materials for technological allowances.

Keywords. Pressed and bent profiles, aluminum alloy, roll forming, straightening by stretching, longitudinal bending, twisting, cladding layer.

Прессованные и гнутые профили являются основными видами заготовок для изготовления элементов каркасов фюзеляжей и других агрегатов самолетов производимых на Филиале ПАО «Ил» - Авиастар. В последнее время значительные объемы тонкостенных гнутых Z-образных профилей из высокопрочных алюминиевых сплавов перерабатываются для

изготовления стрингеров панелей фюзеляжа современных российских самолетов МС-21 и ИЛ-112В.

В процессах термообработки, транспортировки и формообразования тонкостенные профили из алюминиевых сплавов приобретают следующие виды дефектов:

1. Продольный изгиб (отклонение от прямолинейности) до 10 мм на метр;
2. Скручивание вокруг продольной оси до 5 градусов на метр;
3. Отклонение в поперечном сечении элементов профиля относительно заданного положения до 3 градусов;
4. Продольная волнистость полок и стенок профиля до 20 мм на метр;
5. Выпуклость и вогнутость в поперечном сечении профиля до 3 мм.

На рис. 1 представлены тонкостенные профили из алюминиевых сплавов с различными видами дефектов.



Рис. 1 Тонкостенные профили из алюминиевых сплавов с различными видами дефектов

Правка дефектов на тонкостенных прессованных и гнутых профилях в настоящее время выполняется с использованием ручного ударного инструмента на специальных плитах. А это требует значительных трудозатрат и высокой квалификации работников. Механизация процессов правки профилей затруднена большой номенклатурой профилей по размерам и материалам (например, на одном из выпускаемых на Филиале ПАО «Ил» - Авиастар самолетов используется более 120 видов профилей). Правка гнутых тонкостенных профилей с лакирующим слоем осуществляется на растяжных прессах в свежезакаленном состоянии, что ограничивает продолжительность процесса правки (до 0,5 часов), т. к. в последующем эти профили в свежезакаленном состоянии еще должны пройти другие формообразующие технологические операции. Процессы правки на растяжных гидравлических прессах ПГР предполагают индивидуальное закрепление и растяжку каждого профиля, а это приводит к значительным трудозатратам. При увеличении объемов производства потребуется использование большого числа растяжных гидравлических прессов, что экономически не целесообразно и требует больших производственных площадей и значительных трудозатрат.

В АО «Ульяновский НИАТ» разработана высокопроизводительная технология интенсивного деформирования профилей гибкой-прокаткой в роликах для правки прессованных и гнутых профилей. В данной технологии правка профилей осуществляется упругопластическим изгибом в сторону противоположную устраняемым дефектам, при этом создаваемые роликами сжимающие напряжения в поверхностном слое должны достигать предела текучести материала профиля. Данная технология особенно перспективна на заготовительно-штамповочном производстве Филиале ПАО «Ил» - Авиастар при правке тонкостенных гнутых профилей после термообработки. Внедрение данной технологии позволит не только ускорить процессы правки

профилей, но и сократить расход материалов для изготовления заготовок стрингеров панелей фюзеляжа самолета.

Библиографический список

1. Марковцев В.А., Баранов А.С., Попов А.Г., Левшонков Н. В. Совершенствование технологий продольной гибки профильных авиационных деталей // Изв. вузов. Авиационная техника, 2020.-№4.-с. 201-203.

2. Попов А. Г., Марковцев В. А., Баранов А.С., Карпов А. Н. Правка роликами прессованных и гнутых профилей из алюминиевых сплавов // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: Тез. докл. V Междунар. научно- практ. конф. (24-25.11. 2016 г.). – Ульяновск : УлГУ, 2016 с. 181-182.

УДК 629.7.002:621.981

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК СТРИНГЕРОВ ПАНЕЛЕЙ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА В СВЕЖЕЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ

Марковцев В. А.¹, Попов А. Г.², Чаплыгин Е. А.³

1 – д.т.н. генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ»

2 – к.т.н., генеральный директор ООО «Авиапрофиль»

3 – студент группы Омбд – 31 УлГТУ

Аннотация: Предлагается эффективная технология изготовления прямолинейных заготовок стрингеров панелей фюзеляжа самолета, в которой закалка производится когда исходный алюминиевый сплав находится в виде ленты. В последующем из свежезакаленной ленты гибкой-прокаткой на станке ГПС в процессе формообразования гнутого Z-образного профиля производятся прямолинейные заготовки стрингеров, с которыми не надо производить термообработку и правку.

Ключевые слова: Гнутые Z-образные профили, гибочно-прокатный станок, закалка, заготовка стрингера, лента, свежезакаленное состояние, специальная катушка.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING BLANKS OF THE AIRCRAFT FUSELAGE STRINGERS PANELS IN A FRESHLY HEATED STATE

Markovtsev V. A.¹, Popov A. G.², Chaplygin E. A.³

1 – associate Professor, Candidate of Technical Sciences, kaf. "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

2 – General Director, Doctor of Technical Sciences of JSC "Ulyanovsk NIAT", Head of the Department "Technologies of ZSHP" UlSTU, Ulyanovsk

3 – Student 3 years of the department. "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

Abstract: An effective technology for manufacturing rectilinear billets of stringers of aircraft fuselage panels is proposed, in which quenching is performed when the initial aluminum alloy is in the form of a tape. Subsequently, straight-line blanks of stringers are produced from the freshly baked flexible-rolling tape on the GPS machine during the shaping of the bent Z-shaped profile, with which it is not necessary to perform heat treatment and straightening.

Keywords: Bent Z-shaped profiles, bending and rolling machine, hardening, stringer billet, tape, freshly baked condition, special coil.

В настоящее время на Филиале ПАО «Ил» - Авиастар гнутые Z-образные тонкостенные профили для стрингеров панелей фюзеляжа самолета МС-21 изготавливаются из ленты алюминиевого сплава В95 в состоянии поставки после отжига (состояние М). Формообразование профилей выполняется на автоматизированной гибочно-прокатной линии со станком ГПС-350, разработанной и изготовленной АО «Ульяновский НИАТ» [1]. Далее производится термообработка (закалка) прямолинейных профилей,

длина которых достигает 8,5 м, а затем правка профилей растяжением на гидравлических прессах ПГР. И термообработка и правка габаритных профилей не технологичны, связаны с высокими затратами на оборудование и энергоресурсы.

На рис. 1 представлены образцы гнутых Z-образных тонкостенных профилей из алюминиевого сплава В 95, которые предлагается изготавливать из ленты в свежезакаленном состоянии.

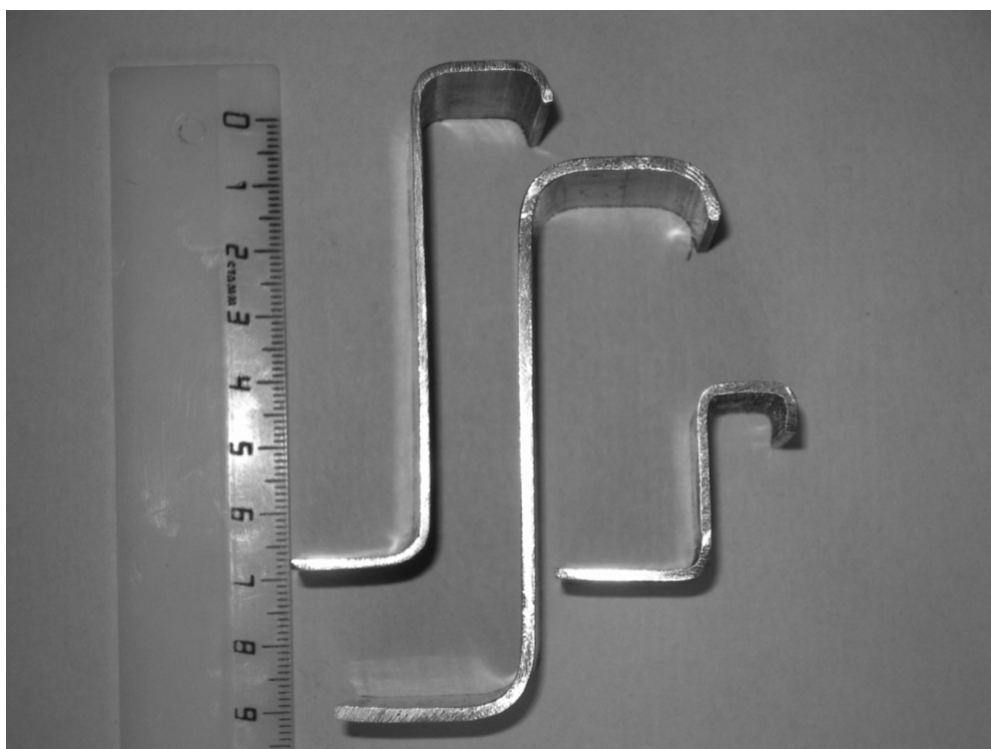


Рис. 1. Гнутые Z-образные тонкостенные профили из алюминиевого сплава В 95

По предлагаемой технологии термообработка (закалка) производится, когда исходный алюминиевый сплав находится в состоянии ленты заданной ширины и длины на специальных катушках [2]. Количество материала располагающегося на этих катушках и его параметр определяются производственным заданием на изготовление заготовок стрингеров. Термообработка ленты из алюминиевого сплава на компактных специальных катушках позволяет использовать электротермические

агрегаты с небольшими рабочими камерами и существенно экономить энергоресурсы на нагрев оборудования.

В последующем изготовление Z-образного гнутого профиля из свежезакаленной ленты алюминиевого сплава производится на автоматизированной линии с гибочно-прокатным станком ГПС-350. На выходе могут быть получены прямолинейных или изогнутые за заданный радиус продольной кривизны Z-образные профильные заготовки стрингеров, которые не требуют последующей термообработки (закалки), а получают повышенную прочность и твердость естественным старением. Таким образом, происходит совмещение процессов формообразования и правки гнутых тонкостенных профилей. Реализация данной технологии предполагает доработку гибочно-прокатного станка ГПС-350, отработку технологических операций термообработки и формообразования в условиях действующего производства, т. к. свежезакаленное состояние алюминиевого сплава в специальной катушки после термообработки (закалки) сохраняется в производственных условиях не более 2 часов.

Внедрение предлагаемой технологии изготовления заготовок стрингеров не только упрощает процессы термообработки (закалка производится на специальных катушках), но и экономит материал на технологических припусках, а также исключает необходимость в правке заготовок стрингеров растяжением (снижаются трудозатраты).

Библиографический список

1. Марковцев В.А., Баранов А.С., Попов А.Г., Левшонков Н. В. Совершенствование технологий продольной гибки профильных авиационных деталей // Изв. вузов. Авиационная техника, 2020.-№4.-с. 201-203.

2. Попов А.Г., Марковцев В.А. Разработка технологии изготовления прямолинейных заготовок стрингеров самолета МС-21 в свежезакаленном

состоянии // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: Тез. докл. V Междунар. научно- практ. конф. (24-25.11. 2016 г.). – Ульяновск : УлГУ, 2016 с. 81-82.

Секция 2

«Инженерный анализ и автоматизация»

УДК 621.981

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ (ОБЗОР)

Гульшин В.А.¹, Филимонов С.В.², Филимонов В.И.³

1 – нач. Центра подготовки специалистов АО «Ульяновский механический завод», к.т.н., доц.;

2 – начальник отдела АО «Аэрокомпозин» (г. Ульяновск), д.т.н.;

3 – ВНС АО «Ульяновский НИАТ», д.т.н., профессор

Аннотация: В данном обзоре показаны ограничения в широком применении гнутых тонкостенных профилей как с точки зрения средств расчёта конструкций, так и нормативной базы. Уровень развития технологий профилирования практически не ставит перед промышленностью проблем изготовления профилей и панелей.

Ключевые слова: гнутый профиль, элемент жёсткости, расчёт на прочность и устойчивость, профилирование в валках, метод интенсивного деформирования.

SOME ISSUES OF DESIGN AND MANUFACTUREING OF ROLL-FORMED PROFILES (REVIEW)

Gulshin V.A.¹, Filimonov S.V.², Filimonov V.I.³

1 – head of Trainig center of the «Ulyanovsk Mechanical Plant», JSC, k.t.s., asc. prof.;

2 – head of department of «Aerocomposite», JSC (city of Ulianovsk), d.t.s.,

3 – SR of «Ulyanovsky NIAT», JSC, d.t.s., professor

Abstract: This review shows some restrictions impeding a large application of thin-walled roll-formed profiles and arising from feeble calculation procedures and insufficient legal norms. The technological level of industrial production sets no problems relating to profiles or panels production.

Key words: roll-formed profile, rigidity element, strength and stability calculation, roll-forming, intensive deformation method.

В отечественной промышленности широко применяются гнутые профили, потребность в которых неуклонно повышается и составляет к настоящему времени 2,6 млн. тонн (рис. 1), причём, номенклатура освоенных профилей в мире превышает 5 тыс. [1]. Преимущества гнутых профилей по сравнению с горячекатаными в конструктивном

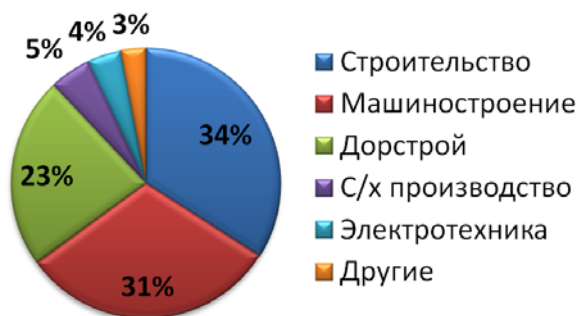


Рис. 1. Потребность в гнутых профилях по отраслям РФ (всего 2,6 млн. т)

применении и при их изготовлении хорошо известны [1].

При создании новых конструкций гнутых профилей имеется в виду, что с приемлемой вероятностью проектируемый профиль должен сохранять его функциональность в течение планового периода службы при минимальных затратах на создание, эксплуатацию и утилизацию. Здесь минимизация подразумевается глобальная. Иногда, однако, разработчик считает, что он должен учитывать требования функциональности, прочности, обслуживания, эстетичности и экономичности, причём экономичность рассматривается лишь как экономия материала [2], без учёта технологических издержек. В наше время создание новых конструкций профилей имеет ряд особенностей: 1) привязка конструкции профиля к конкретной системе эксплуатации; 2) оптимизация по массе с учётом фактического нагружения в конструкции; 3) введение ряда элементов жёсткости, повышающих несущую способность профиля в изделии; 4) введение дополнительных элементов, связанных с монтажом и эксплуатацией (соединительные элементы типа фальцев и отбортовок, просечка, надрезка, перфорация для вентиляции и теплоизоляции и т.п.); 5) применение новых материалов; 6) возможность комбинации металлического профиля с другими материалами; 7) возможность широкого применения МКЭ для выполнения расчётов; 8) возможность использования специализированных программ для разработки оптимальных конструкций профилей; 9) повышение возможностей технологий профилирования (например, производство профилей переменного сечения), снимающих ряд технологических ограничений на конструкцию профиля.

Цель публикации – обзор существовавших и современных подходов к конструированию гнутых профилей с учётом указанных выше особенностей.

Привязка конструкции профиля к конкретной системе возведения и эксплуатации зданий. В первом десятилетии 21 века применение легких металлоконструкций с

толщиной до 4 мм составляло в процентах к общему объёму

металлопроката (в промышленном/гражданском

строительстве) США – 31/36 %, во Франции –

38/32 %, в России – 50/10 %. Хотя выпуск стали в РФ достаточно

велик, однако производство

тонколистового проката остаётся на уровне 20% от общего производства стали, а профилированного проката – на уровне (5 – 7) % [3]. Однако ещё более 60 лет назад были намечены пути внедрения гнутых профилей проката в отечественное промышленное строительство, машиностроение, транспортное и дорожное строительство [4]. В последующие годы применение гнутых профилей [5] и их производство неуклонно расширялось [6, 7], а в последнее десятилетие разработаны новые виды профилей, преимущественно в сфере строительства, и определены их производители [8, 9]. За последние 30 лет обозначилось применение отечественных гнутых профилей, преимущественно из алюминиевых сплавов, в авиастроении [10]. Возросла потребность в стальных гнутых профилей в машиностроении, транспортном и дорожном строительстве, возведении объектов с/х

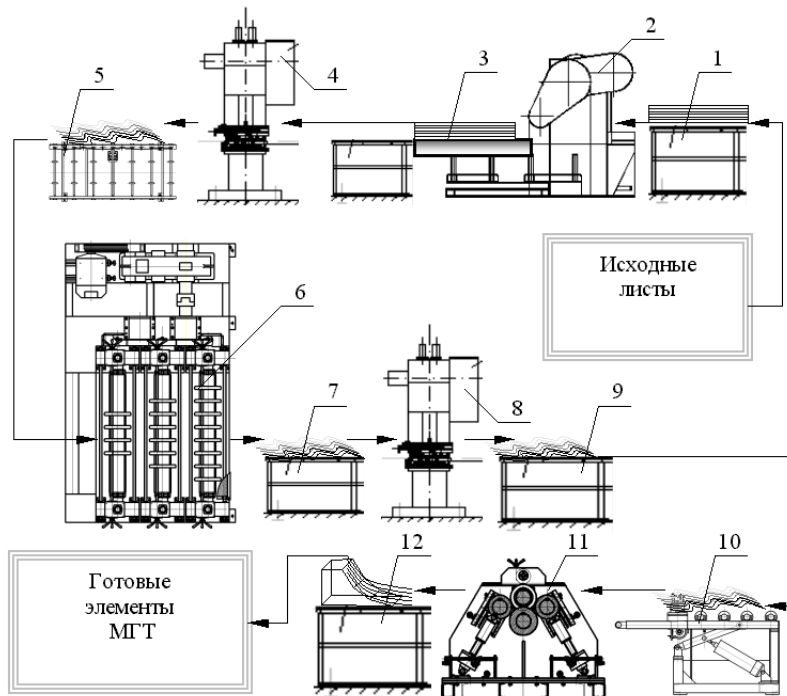


Рис. 2. Технологический маршрут и общая компоновка оборудования для производства МГТ

назначения (теплиц, зернохранилищ и пр.) [11, 12]. В дорожном строительстве вместо авто- и железнодорожных мостов применяют переходы с арочным покрытием или гофрированными трубами большого диаметра под грунтовую засыпку. Около десятилетия назад АО «Ульяновский НИАТ» разработало технологию производства (рис. 2) секционных металлических гофрированных труб (МГТ) (рис. 3) для ОАО «Алексинстройконструкция» [13], которое выполнило десятки проектов по оснащению транспортных путей в Российской Федерации.

Гражданское и особенно промышленное строительство остаются наиболее значительными потребителями гнутых, преимущественно, крупногабаритных профилей, для которых разработана номенклатура, включённая в различные если не стандарты, то технические условия [8, 14 – 24]. Эта номенклатура гнутых профилей является оптимальной с точки зрения весовой отдачи при использовании в конструкциях панелей и каркасов. Табл. 1 представляет различные системы строительных конструкций, использующих гнутые, преимущественно стальные профили [3, 8, 9].

Следует заметить, что номенклатура строительных, особенно гофрированных профилей, остаётся достаточно консервативной в плане типоразмеров, хотя в последние годы наблюдается введение различных элементов жёсткости на гофрах – продольные рифты или поперечные рифты

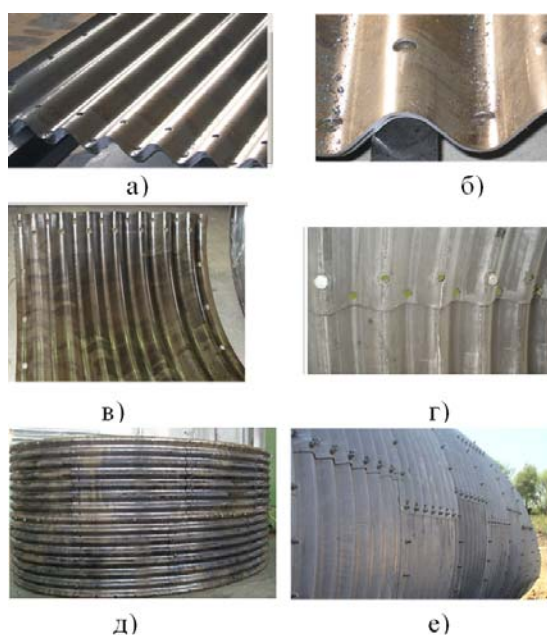


Рис. 3. Элементы МГТ и труба в сборе: а, б – перфорированный элемент без продольной кривизны; в – гофрированная панель с перфорацией и продольной кривизной; г – болтовое соединение элементов МГТ; д, е – гофрированные трубы в сборе

на стенках гофр. Введение элементов жёсткости приближает эти профили к классу профилей повышенной жёсткости [1].

Таблица 1. Системы возведения зданий и сооружений

Система	Особенности	Реализация
“Wide span”	Сварные гнутые двутавры из стали повышенной прочности и тонкостенные профили С-образного и зетового типа. Соединения на фланцах и высокопрочных болтах. До 30% промышленных зданий в США выполнены по данной системе.	“Butler manufacturing corp.” (USA)
“Custom”	Одноэтажные производственные здания. Несущие элементы в основном зетового типа, рамные конструкции – сварные. Крыша – однослойный профилированный лист с фальцевым стыком и рулонной изоляцией	“Mid-West” (Texas, USA)
“RBS”	Промышленные и гражданские здания. Рамные конструкции из стандартных секций на болтах, продольные связи – зетовые профили высотой 210 – 260 мм	“Robertson building systems” (Canada)
“BM”	Одноэтажные промышленные здания. Двух-шарнирные решетчатые рамы с шагом 4,5 м и стропильные фермы	“Blankenburger Metallbau GmbH”, Germany
“MPI”	Одно-двухэтажные здания из стальных и алюминиевых профилей различного функционального назначения. Основа – рамный каркас из модулей. Гнутые профили из стали толщиной 2,5 мм. Соединение – шпилечное	“UMEL”, France, Belgium, Yugoslavia
«Канск», разработка ЦНИИПСК им. Мельникова	Промышленные здания различного назначения. Ригели из сварных двутавров, высота до ригеля 4,8; 6,0; 7,2 м, шаг несущих рам – 6,0 м, два вида исполнения торцов, фахверк – из прямоугольных гнутых труб или из сварных С-образных профилей; монтажные узлы выполнены на болтах	Изготовитель «Канский ЗЛМК» (здания для переработки с/х продукции, выпуска ТНП)
«Орск», разработка ЦНИИПСК им.	Промышленные здания для работы с неагрессивными средами. Сварные коробчатые профили в раме с усилением листами со штампованными гофрами. Сопряжение с фундаментом – шарнирное.	«Орский ЗЛМК»

Мельникова		
«Уникон», разработка Кемеровского ЦНИИПроектегконструкция	Многоцелевые здания: склады, цеха, гаражи, магазины, торговые павильоны, ангары, овощехранилища. Сварные двутавры переменного сечения, сопряжение ригеля с колоннами – болтовое, с фундаментом – шарнирное; наличие доборных панелей и элементов. Экономия металла в сравнении с другими проектами – до 32 %.	АО «Лекон» (г. Канск). Аналогии конструкций: «Молодечно», «Кисловодск»
«БКЗ», Красноярский Промстрой-НИИпроект	Быстровозводимые сборно-разборные здания и сооружения. Базовый элемент – складная секция (6×3×0,8 м, вес – 2,1 т) из зетового профиля и равнополочного швеллера (подкосы – из С-образного профиля). Покрытие – треугольные фермы со складывающейся решеткой	«Красноярский ЗЛМК» (подвижные склады и производства).

Отечественные системы различаются: 1) числом пролётов; 2) шагом рам (6 и 12 м); 3) способом крепления колонн в фундаменте; 4) схемой ригеля; 5) монтажными соединениями; 6) системой покрытия; 7) уклоном кровли и числом скатов. Наиболее крупные производители гнутых профилей для строительства (кроме предприятий, указанных в табл. 1): Группа Компаний «Стальные конструкции», ЗАО «Эксергия» и АО «Ласар» (г. Липецк), ООО «Венталл» (г. Обнинск), АО «Балтпрофиль» (г. Санкт-Петербург), АО «Канадский дом» (г. Новосибирск), АО «Волжскполимер» (г. Волжский), ИСК «Финеско» (г. Саратов), АО «Электроцит» (г. Самара) [25].

Отечественные разработчики конструкций гнутых профилей, особенно разработчики технологий их производства, ориентированы на применение профилей в системах конструкций, созданных за рубежом. Сдерживающие факторы эффективного применения гнутых профилей в РФ: 1) отсутствие национальных стандартов на расчёт, проектирование, производство, монтаж и эксплуатацию тонкостенных профилей; 2) недостаточная теоретико-экспериментальная база расчётов при статических и динамических

нагрузках; 3) отсутствие данных о работе конструкций в агрессивных средах; 4) отсутствие контроля за качеством иностранных проектов [25].

Оптимизация по массе с учётом фактического нагружения в конструкции. Вопросы оптимизации конструкции профилей возникали во времена начала прошлого века, а также в более позднее время [26– 29]. В работах Тимошенко С.П. рассмотрены общие вопросы потери устойчивости и оптимальности конструкций применительно к конкретным условиям их работы (условиям закрепления элементов). В работе [27] рассмотрены частные вопросы оптимальности для конкретных типов профилей. Например, оптимальный размер отбортовки С-образного профиля с относительной шириной полки около 20 составляет 6,84, что рассчитано по приводимой ниже формуле:

$$d_{отб} = 2,8 \cdot s^4 \cdot \sqrt{\frac{b^2}{s^2} - 144},$$

где s – толщина металла; b – ширина полки.

В той же работе [27] даны зависимости для оценки жёсткости гофр на различных гофрированных профилях (например, на рис. 4) и показан итерационный способ приближения конструкции к оптимальной.

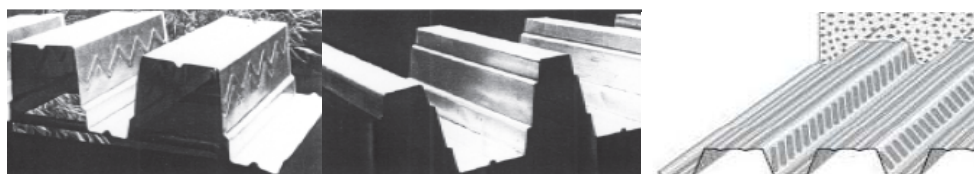


Рис. 4. Гофрированные профили с продольными элементами жесткости в форме рифтов (два профиля слева) и поперечными рифтами на стенках гофра (профиль справа)

В работе [28] принят подход, основанный на значениях коэффициентов напряжений для жёстких и нежёстких полок, выраженных в графическом виде. Также установлены коэффициенты формы для оптимальных сечений профилей согласно теории В.З. Власова для различных видов нагружения

(сжатие, изгиб, кручение). Здесь же даны многочисленные примеры расчётов для конкретных типоразмеров профилей. В справочнике [29] приведены характеристики жёсткости для значительной для того времени номенклатуры гнутых профилей.

К настоящему времени вопросы оптимизации конструкций профилей получили дальнейшее развитие. В работе [30] представлены методы расчёта и оптимизации формы сечения профиля применительно к действующим нагрузкам (сжатия – растяжения, изгибным, изгибно-крутильным и т.д.). Эта монография представляет собой универсальное издание, охватывающее все виды нагружения, в том числе комбинированные. Здесь доминируют аналитические модели, позволяющие системно исследовать вопросы чувствительности различных конструкций к специфическому нагружению. Здесь же показано, что в ряде случаев отбортовка оптимального размера не должна быть расположена по отношению к полке под углом 90° (как это принято в традиционной номенклатуре гнутых профилей).

В практическом приложении следует указать руководящие документы в строительной практике Австралии и Европы [31, 32], где расчёты основаны на принципе приведения (редуцирования) различных элементов профиля. Расчётные зависимости для профилей и различных видов нагружения сведены в алгоритмы для машинных расчётов конструкций. Следует также отметить две работы отечественных авторов, относящиеся к теоретическим принципам расчёта и конструирования [33, 34], особенно применительно к системам ЛСТК.

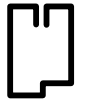
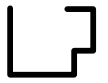





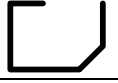

Введение ряда элементов жёсткости, повышающих несущую способность профиля в изделии, а также облегчающих монтаж и эксплуатацию. Повышение жёсткости гнутого профиля часто достигается введением срединных или краевых (периферийных) элементов жёсткости (ЭЖ), которые представляют собой «надстройку» подгибаемой полки. По типовой разновидности КЭЖ может представлять собой подсечку (сдвиг

части полки), отбортовку, элемент двойной или тройной толщины, дуговой, кольцевой или петельный элемент, а также продольные или поперечные рифты [35]. Соединительные элементы типа фальцев и отбортовок облегчают сборку, а просечка, надрезка и перфорация используются для вентиляции и теплоизоляции.

Номенклатура гнутых профилей, представленная многими разработчиками конструкций профилей, достаточно широка (табл. 2). Эти профили применяются преимущественно в строительной отрасли для изготовления окон, дверей, крепления гипсо - волокнистых листов (ГВЛ) и др.

Таблица 2. Гнутые профили с ЭЖ различных разработчиков

Марка профиля	Разработчик конструкции профиля	Назначение	Эскиз сечения
C75 (74x47x0,6...0,8)	ООО «Аркада»	Профиль несущего каркаса	
ВПС 160-55-1,5 Рифт 30x19	ООО «Венталл»	Профиль несущего каркаса	
ППЖ 150Сх1,2	ООО «Аркада»		
60x28x0,6 (0,8)	Knauf	Профиль фахверка, перегородки	
AR СД 66-1 99x31x1,2	ООО «Аркада»	Стойчатый профиль	
202462 (36x26,5x6,5x1,5)	Schuco	Армирующий профиль для конструкций	
6505075 (37,5x26,5x1,5)	Plastmo		
2024645 (36x26,5x6,5x2,0)	Schuco	Армирующий профиль для конструкций из ПВХ	
80120 (31x26x2,0)	LG		
520708 (33x27,5x1,5)	Trocal		
VS 102 (42x26,6x1,5)	Brugmann	Армирующий профиль конструкций из ПВХ	
113117 (34x34,5x1,5)	Veka		
VS 105 (40,8x26,6x2,0)	Brugmann	Армирующий профиль для конструкций из ПВХ	
9234	Kommerling		

Марка профиля	Разработчик конструкции профиля	Назначение	Эскиз сечения
(36x24,3x1,8)		ПВХ	
SWR 5S (39x20x1,5)	Spectrus		
AS 103 (25x35x1,5)	Tryba	Армирующий профиль	
6505015 (34,5x29x1,5)	Plastmo	Армирующий профиль	
AS 100 (35x25,5x1,5)	Tryba	Армирующий профиль	
6505075 (37x32,1x1,5)	Plastmo	Армирующий профиль	
41x25x2,0	Technoplas	Армирующий профиль	
110108 34x31,7x2,0	Trocal	Армирующий профиль для конструкций из ПВХ	
8703 43x27,5x1,5	Gealan		
S-311.0.04.01 34x26x1,5	Greiner	Армирующий профиль	
262800 33x25x1,5	Dimex	Армирующий профиль	
ФПК-508-0,5 ((308...508)x38)	Knudson Manufacturing Ltd.	Профиль для кровли	

Профили с элементами двойной толщины (табл. 3) служат в качестве армирующих элементов дверей, окон, кровли и стеновых панелей, элементов вентиляционных каналов, крепления сайдингов, монтажа электротехнических коммуникаций, осветительной арматуры, облицовки дверных проёмов, подоконников и плинтусов. Профили с дуговыми элементами жёсткости серии AR применяют в промышленном строительстве для монтажа подвесных потолков и в качестве крепёжных элементов. Профили серии ОПС восьми типоразмеров разработки фирмы VoestAlpine используют для облицовки стен; профиль компании Gasparini (Испания) с дуговыми элементами различной кривизны применяют в качестве водосточных желобов. Указанные компании являются также и

производителями профилей этого типа. Профили с кольцевыми элементами жёсткости применяют при изготовлении лестничных перил.







Таблица 3. Профили с элементами двойной толщины и другими ЭЖ

Марка профиля	Разработчик конструкции профиля	Назначение	Эскиз сечения
261781/10 (35x28x1,5)	Rehau	Армирующий профиль	
113090 42x33,5x1,5	Veka	Армирующий профиль	
113292 (38,8x29,7x1,5)	Veka	Армирующий профиль (длина ЭДТ= var)	
926008 (34,2x25x1,5)	Trocal	Армирующий профиль	
113292 38,8x29,7x1,5	Veka	Армирующий профиль	
113229.1W 34x27,8x1,5	Veka	Армирующий профиль	
113306.1W 34x34,5x1,5	Veka	Армирующий профиль	
113706 27,5x25x1,5	Veka	Армирующий профиль	
113268.1W 38,8x29,7x1,5	Veka	Армирующий профиль	
36,7x27,5x2,0	Technoplast	Армирующий профиль	
245526 (35x20x2,0)	Rehau	Армирующий профиль	
244506 (35x28x2,0)	Rehau	Армирующий профиль	
244506 (35x28x1,5)	Rehau	Армирующий профиль (длина ЭДТ= var)	
244525 (35x28x1,5)	Rehau		
ВСЖ-191-0,5 (127(83)x89x0,5)	ГК «Стройпромет»	Водосточный жёлоб	
П-0,8...1,2 (300x(110...136))	ООО «Аркада»	Арочные покрытия	
С-0,8...1,2 (304x110)	ООО «Аркада»	Арочные покрытия	

Профили с петельными элементами (чаще всего в виде «сваленной петли») применяются в качестве облицовки (сайдинга) в строительной

индустрии (табл. 4). Производителями этих профилей в России являются многие компании, среди которых ГК «Стройпромет», а разработчиком технологии являются ОАО «Ульяновский НИАТ» (г. Ульяновск) [10]. Применение профилей с КЭЖ в транспортном и энергетическом машиностроении, производстве мебели и строительстве обусловлено возможностью получения профилированием любой конфигурации поперечного сечения профиля, различных размеров по ширине, толщине и длине, с высоким качеством поверхности.

Таблица 4. Профили с петельными и другими ЭЖ в России

Марка профиля		Технические условия на поставку	Эскиз сечения
	<i>ОКР-505-0,5</i> (505x11,4x0,5)	ТУ 5262-100-02494680-99	
	<i>ОКР-505-0,55</i> (505x11,4x0,55)		
	<i>ОКР-505-0,6</i> (505x11,4x0,6)		
	<i>ОСУ-495</i> (495,3x11,4x0,5)	ТУ 5262-100-02494680-99	
	<i>ССД-190-0,5</i> (217x14x0,5)	ТУ 1121-001-50169721-02	
	<i>СЕД-189-0,5</i> (216x14x0,5)	ТУ 1121-001-50169721-02	
	<i>СЕД-187-0,5</i> (210x14x0,5)	ТУ 1121-001-50169721-02	
	<i>СВУ-190-0,5</i> (217x14x0,5)	ТУ 1121-001-50169721-02	
	<i>СВШ-191-0,5</i> (217x14x0,5)	ТУ 1121-001-50169721-02	
	<i>СФТ-334-0,5</i> (502x14x0,5)	ТУ 1121-001-50169721-02	

Важным показателем является эффективность применения профилей с ЭЖ, которые лишь незначительно уступают профилям повышенной жёсткости с продольными, а иногда и поперечными рифтами [1].

Применение новых материалов и возможность комбинации металлического профиля с другими материалами. Основным материалом гнутых профилей служит оцинкованная сталь, производство которой в РФ с

каждым годом неуклонно увеличивается на десятки процентов, также как и производство ленты с полимерным покрытием. Срок службы профилей с полимерным покрытием составляет порядка 30 лет (по данным корпорации British Steel). Широко известны сэндвич-панели с пенным наполнителем, применяемые в строительстве. Мелкосортные профили с покрытием часто используют для отделки промышленных и гражданских зданий и сооружения, а также для армирования изделий из ПВХ [36]. При выполнении расчётов несущей способности профилей с покрытием его влияние обычно не учитывается. В расчётах панелей, рам и иных конструкций с использованием комбинаций с другими материалами создаются новые методики расчёта, реализуемые преимущественно в виде пакетов программ для ЭВМ.

Возможность широкого применения МКЭ и специализированных программ для разработки оптимальных конструкций профилей. Как уже отмечалось, конструкция гнутого профиля может стать оптимальной, если она проектируется с учётом её работы в конструкции (учёт условий соединения и видов нагружения). Приложение «Advance Steel» к трехмерному AutoCAD служит для проектирования металлоконструкций. Модель содержит объекты металлоконструкции (балки, пластины, профильные элементы и средства их сопряжения). База данных по гнутым профилям в этом приложении включает все основные типы профилей большинства известных фирм (Albion, Ayrshire, Canfer, Fisher, HiSpan, Krupp, Metsec, SAB, SADEF, Staba, Ward, Zeta), однако имеется возможность создания пользовательского вида профиля для данной конструкции. При проектировании возможна виртуальная обработка профиля, а для готовой конструкции генерируется спецификация входящих в неё компонентов. Разработанная конструкция может передаваться в прикладные пакеты на основе МКЭ для выполнения требуемых расчётов [37].

В РФ применение конструкций из тонкостенных гнутых профилей сдерживается ограниченными возможностями применения отечественной нормативной базы для оценки их прочности и устойчивости [38]. Дело в том, что в СНиП (2004 г.) заложены ограничения на соотношения линейных размеров и толщины профиля (толщина более 4 мм), которые обычно не выполняются для гнутых тонкостенных профилей. Для толстостенных профилей гарантируется исчерпание прочности до наступления локальной потери устойчивости при действующей нагрузке. Однако локальная потеря устойчивости ещё не исчерпывает несущую способность

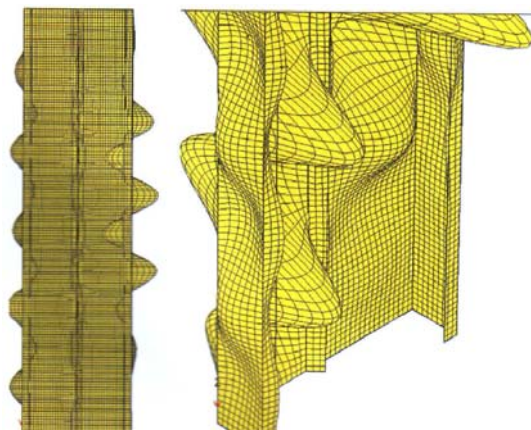


Рис. 5. Сохранение несущей способности элемента при локальной потере устойчивости

элемента (рис. 5 – по результатам моделирования в ПК MicroFe). Расчётные процедуры прочности и устойчивости по отечественным и зарубежным методикам основаны на решении одних и тех же задач механики, но с различием коэффициентов понижения критических сил (концепция редуцированного сечения В.З. Власова). Существующие отечественные методики распространяются на ограниченный класс сечений, в то время как в странах Европы они приложимы к произвольным конфигурациям (сечения четвёртого класса) в Еврокоде EN-1993-1-3 [32] (и немецком DIN 18800).

В ЦНИИПСК им Мельникова усовершенствованы методики для расчёта тонкостенных конструкций и на их основе созданы новые конструкции строительных профилей, производимых ГК «Стальные профили» и другими предприятиями [25]. Однако в РФ не существует единой методики расчётов тонкостенных профилей с учётом редуцированной площади сечения, поэтому необходима разработка соответствующих методик и проведение экспериментальных работ по их верификации [39, 40]. На рис.

б представлена процедура таких исследований и некоторых их результатов (за исключением поз. «е» [41]).

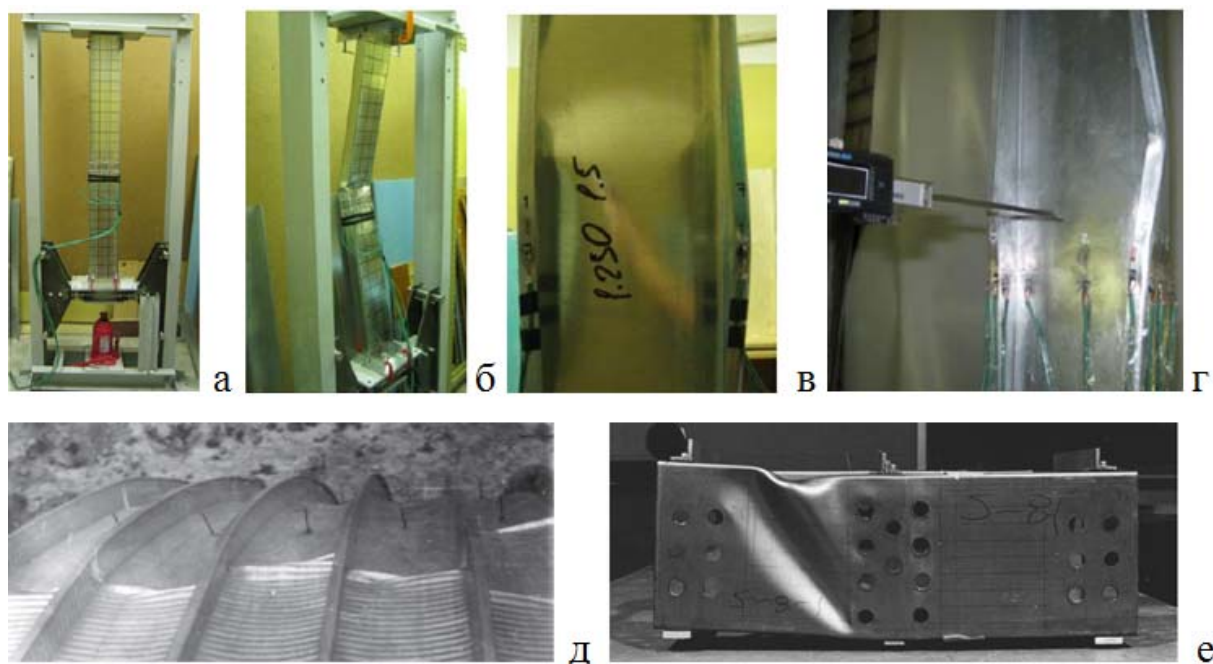


Рис. 6. Испытания тонкостенных профилей на стендах (а, б) и панели после потери устойчивости (в, г); д – потеря устойчивости арочных перекрытий; е – потеря устойчивости крупногабаритной строительной панели при кручении

Вопросами расчёта тонкостенных профилей и созданием новых конструкций из них усиленно занимается ЦНИИПСК им Мельникова и Красноярская архитектурно-строительная академия с использованием пакетов конечноэлементного моделирования «Лира», «Космос», «Astra», «MicroFe» и др. [42]. Аналогичные вопросы решаются и зарубежными исследователями [43 – 45].

Повышение возможностей технологий профилирования. В настоящее время технологии производства гнутых профилей достаточно хорошо развиты и применяют высокопроизводительное технологическое оборудование. Разработка технологического оснащения для изготовления сложных тонкостенных профилей часто осуществляется с помощью САПР.

Созданы также системы производства гнутых профилей переменного сечения (преимущественно для автомобильной промышленности): системы *KNAUF*, *RiHTeR*. Эти и другие вопросы производства гнутых профилей, в том числе для опытных образцов профилей и панелей с минимизацией затрат на изготовление небольших партий профилей, можно найти работе [36].

Таким образом, настоящий обзор показывает, что существует ряд ограничений в создании и широком применении тонкостенных профилей и конструкций из них в ряде отраслей, преимущественно в строительстве. Для производства опытных образцов и среднесерийного производства таких профилей идеально подходит метод интенсивного деформирования и сопутствующие технология и оборудование для его реализации.

Библиографический список

1. Стальные гнутые профили / Н.Г. Шемшурова, Н.М. Локотунина, В.Г. Антипанов и др. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. 286 с.
2. Лизин В. Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1976. – 408 с.
3. Каркасы зданий из лёгких металлических конструкций и их элементы. М.: Изд-во АСВ, 1998. 247 с.
4. Лейченко М.А. Производство и применение гнутых профилей. // Рационализация профилей проката. – М.: Профиздат, 1956. – С. 189 – 203.
5. Развитие металлических конструкций /Кузнецов В.В., Беленя Е.И., Стрелецкий Н.Н. и др. – М.: Стройиздат, 1987. 576 с.
6. Чекмарёв А.П., Калужский В.Б. Гнутые профили проката. М.: Металлургия. 1974. 264 с.
7. Производство гнутых профилей на Магнитогорском металлургическом

- комбинате / В.Ф. Рашников, М.Ф. Сафронов, В.Г. Антипанов и др. Магнитогорск: МаГТУ, 1999. 157 с.
8. Сортамент холодногнутой профилей из оцинкованной стали для строительства. М: НАПСГП, 2002. 150 с.
 9. Жмарин Е.Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 2. С. 27 – 30.
 10. Марковцев В.А., Марковцева В.В., Филимонов В.И. Производство гнутых профилей для авиационных конструкций. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 438 с.
 11. Филимонов С.В., Лапшин В.И., Филимонов В.И. Формовка многоэлементного профиля обрамления двери кузова автомобиля // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: международный сборник научных трудов. – Магнитогорск: МаГТУ, 2012. – 326 с. – С. 215 – 224.
 12. Филимонов А.В., Лапин В.В., Филимонов С.В., Филимонов В.И. Реновация производства профилей тепличных каркасов // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: международный сб. научн. тр. Магнитогорск: Изд-во МаГТУ. 2014. Вып. 20. (355 с.) С. 183 – 192.
 13. Марковцев В.А., Филимонов В.И. Технологический маршрут и оборудование для производства элементов гофрированных труб из листов различной толщины // Автоматизация и современное производство, 2008, № 4. – С. 3- 10.
 14. ТУ 5262-100-02494680-99. Конструкции стальные из гнутых профилей для облицовки наружных стен зданий.
 15. ТУ 1122-181-024946880- 99. Профили стальные гнутые тонкостенные для строительства.

16. ТУ 5262-032-02494680-95. Панели стальные бескаркасные с утеплителем для покрытий и стен зданий
17. ТУ 1122-080-02494680-97. Профили стальные гнутые повышенной жесткости для ограждающих и несущих конструкций.
18. ТУ 1121-029-00110473-98. Профили строительные металлические.
19. ТУ 1108-002-25773051-2000. Профили металлические холодно профилированные.
20. ТУ 5260-065-02494680- 96. Конструкции стальные легкие из гнутых профилей для малоэтажных зданий.
21. ТУ 1120-100-47515705-00. Профили С – образные стальные холодногнутые для строительства.
22. ТУ 1122-075-02494680-2001. Профили стальные холодногнутые для строительства.
23. ТУ 1122-078-02494680-2001. Профили холодногнутые из оцинкованной стали для строительства.
24. ТУ 1122-076-02494680-2001. Профили холодногнутые повышенной жесткости из оцинкованной стали для строительства.
25. Айрумян Э.Л., Беляев В.Ф. Эффективные холодногнутые профили из оцинкованной стали – в массовое строительство // Монтажные и специальные работы в строительстве, 2006, № 11. С. 10 – 17.
26. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 635 с.
27. Тришевский И.С., Клепанда В.В. Металлические облегчённые конструкции. Киев: Будивельник, 1978. 112 с.
28. Гнутые профили проката: Справочник. Сортамент, методы расчёта и области применения. М.: Металлургия. 1967. 379 с.
29. Будур А.И., Белогуров В.Д. Справочник конструктора. Стальные конструкции. Киев: Изд-во «Сталь», 2004. 210 с.

30. Wei-Wen Yu Cold-formed steel design. NY: Wiley & Sons. 2000. 777 p.
31. Economical structural steelwork. McGraw Hill Book Co: Australian steel institute, 2004. 117 p.
32. Eurocodes: Background and applications. Eurocode3: Design of steel structures. Part 1-3: Design of cold-formed Steel Structures. Belgium: Brussels, 2014. 311 p.
33. Копытов М.М. Металлические конструкции каркасных зданий. М.: Изд-во АСВ, 2016. 400 с.
34. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. М.: Изд-во АСВ, 2005. 736 с.
35. Лапин В.В., Филимонов С.В., Филимонов В.И. Гнутые профили с краевыми элементами жёсткости, их применение и основные разработчики конструкций и технологий // Формообразование гнутых профилей: теория и практика (2015 год): сборник научных трудов. – Ульяновск, 2015.– 161 с. – С. 142 – 156.
36. Гречников Ф.В., Филимонов С.В., Филимонов А.В. Метод интенсивного деформирования в профилировании. Самара: изд-во СФИЦРАН, 2020. 320 с.
37. Advance steel. User's guide. Autodesk application compatible with Windows 7 and 8. MSCorp., 2019. 146 p.
38. Зебельян З. Методы расчёта несущих элементов из тонкостенных гнутых профилей // Стройметалл. 2009. № 5(13). С. 14 – 18.
39. Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения холодногнутого С-профиля// Инженерно-строительных журнал, 2013, №5. С. 44 – 51.
40. Айрумян Э.Л., Белый Г.И. Исследования работы стальной рамы из холодногнутых профилей с учётом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 41 – 44.

41. Fernandez O., Putois A., Vinois G. *Projet de construction métallique*. – Paris: ESTP, 2010. 40 p.
42. Шимкович Д.Г. *Расчёт конструкций в VSC/Nastran for Windows*. М.: ДМК, 2003. 448 с.
43. Ghersi A., Landolfo R., Mazzolani F. *Design of metallic cold-formed thin-walled members*. London: Spon press, 2002. 174 p.
44. Brune B., Ungermann D. *Coupled instabilities of cold-formed steel members in minor axis bending // 5-th IC in metal structures, CIMS, 2008*. Sydney, Australia, 23 – 25 June, 2008. 9 p.
45. Shaffer B., Li Z., Moen C. *Computational modeling of cold-formed steel //Thin-walled structures, 2010. Vol. 48. No. 10-11. P. 752 – 762*.

УДК 629.7

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБТЯЖКИ НА ОБТЯЖНОМ ПРЕССЕ FEKD

Михеев В.А.¹, Демидова М.М.², Тарасов С.В.³

1 - доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением Самарского университета,

2 - аспирант кафедры обработки металлов давлением Самарского университета,

3 – магистр кафедры обработки металлов давлением Самарского университета

Аннотация. Создается аналитический метод обеспечения последовательной обтяжки на обтяжном прессе FEKD для организации поддержки вычислений методами конечных элементов на всех этапах моделирования. В результате в Microsoft Excel располагаем блоком аналитических формул и блоком промежуточных расчетов при различных сочетаниях показателей анизотропии и коэффициента трения. Для построения адекватной конечно-элементной модели, проведения расчетов и корректной интерпретации результатов в терминах предметной области необходимы знания не только о геометрической и физической сущности технологической задачи, но и знания о результатах вычислительных алгоритмов.

Ключевые слова: аналитический метод, последовательная обтяжка, вычислительный алгоритм, формообразующий контур, линии кривизны, оболочка двояковыпуклой формы.

ANALYTICAL METHOD FOR ENSURING CONSISTENT TIGHTNESS ON A TIGHT PRESS FEKD

Mikheev V.A.¹, Demidova M.M.², Tarasov S.V.³

1 - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Processing by Pressure of Samara University,

2 - postgraduate student of the Department of Metal processing by pressure of Samara University,

3 – Master of the Department of Metal processing by pressure of Samara University

Abstract. An analytical method is being created to ensure consistent tightness on a tight FEKD press to organize the support of calculations by finite element methods at all stages of modeling. As a result, in Microsoft Excel we have a block of analytical formulas and a block of intermediate calculations for various combinations of anisotropy and friction coefficient indicators. To build an adequate finite element model, perform calculations and correctly interpret the results in terms of the subject area, knowledge is needed not only about the geometric and physical essence of the technological problem, but also knowledge about the results of computational algorithms.

Keywords: analytical method, sequential fitting, computational algorithm, shaping contour, curvature lines, biconvex shell.

Введение

Производство современного самолета требует разработки новых технологических решений, обеспечивающих постоянно растущие требования для улучшения его технико-эксплуатационных характеристик.

Во-первых, большие скорости полета современных самолетов предъявляют жесткие требования к форме и точности выполнения аэродинамических обводов планера. В связи с этим усложнились пространственные формы обводообразующих оболочек и соприкасающихся с ними деталей каркаса, повысилась их точность, что значительно увеличило трудоемкость их изготовления.

Во-вторых, оболочки аэродинамического обвода выполняют функции деталей обшивок, обеспечивающие прочность и неразрушаемость конструкции самолета. Эти функции находят свое отражение в предельно допускаемых толщинах оболочек.

В-третьих, уменьшение массы самолета во многих случаях требует применения крупногабаритных листовых элементов обшивок малой жесткости, что обуславливает отличие от других производств решение вопросов точности, связанных с геометрической увязкой элементов конструкции.

В совокупности выполнение этих требований зависит в первую очередь от возможности получения обводообразующих оболочек минимальной разнотолщинности. Создание новых процессов, в том числе автоматизированных, обтяжных прессов программного управления способных обеспечить получение обводообразующих оболочек минимальной разнотолщинности, открывает дорогу для конструктивного совершенствования современных самолетов. Однако требования заключаются в том, что разработка процессов получения обводообразующих оболочек минимальной разнотолщинности представляет сложную, до сих пор до конца нерешенную задачу. Прежде всего, это создание автоматизированных систем на базе математического моделирования объектов и процессов производства с использованием современных средств вычислительной техники и оборудования с ЧПУ. Для авиационного производства это означает переход от зависимого метода изготовления

деталей на независимый, который позволяет с заданным расчетом степени точности обеспечить взаимозаменяемость. Вместе с тем, при переходе на независимый метод изготовления деталей возникает ряд проблем, от решения которых зависит успешное решение вопросов автоматизации технологической подготовки авиационного производства.

Однако сложность системы технологической подготовки авиационного производства приводит к тому, что основным инструментом может стать оптимизационно-имитационное моделирование [1]. Оптимизационно-имитационное моделирование представляет собой методологию анализа и синтеза в процессе последовательного поиска решения, отбора и уточнение вариантов, выбора значений начальных параметров.

Поэтому должны применяться модели разного назначения: оптимизационные, имитационные, аналитические в сочетании с высокоэффективными средствами моделирования, каким является МКЭ. При этом для построения адекватной конечно-элементной модели, проведения расчетов и корректной интерпретации результатов в терминах предметной области необходимы знания не только о геометрической и физической сущности технологической задачи, но и знание результатов вычислительных алгоритмов.

Аналитический метод оказался пока единственно возможным на тех стадиях подготовки, когда не определена четкая процедура выбора начальных параметров и оценки кинематической схемы формообразования тонколистовых обводообразующих оболочек на обтяжном прессе с программным управлением. При этом оптимизация кинематической схемы последовательной обтяжки, связанная с разработкой такого способа, который позволил бы значительно уменьшить неравномерность деформации растяжения, как в продольном, так и в поперечном направлении листовой заготовки и получить оболочку значительной двойной кривизны минимальной разнотолщинности.

1. **Объект исследования аналитическим методом**

В статье будем рассматривать оболочковую деталь обшивки сложной двояковыпуклой формы значительной двойной кривизны, получаемой обтяжкой на специализированном обтяжном прессе типа FEKD, имеющем числовое программное управление ЧПУ по четырём координатам [2]. Представим, что эта оболочка имеет постоянную толщину. Тогда ее геометрия будет полностью определена, если заданы форма срединной поверхности, толщина и граничный контур. В дифференциальной геометрии поверхностей было доказано, что можно установить центральную точку, в окрестности которой будет близка классическая поверхность, связанная со структурой дифференциальной квадратичной формы. Что позволило найти на поверхности криволинейные координаты, характеризуемые кривизнами в качестве главных сопряженных ортогональных координатных линий и пересекающимися в центральной точке поверхности [3].

На рисунке 1 показана поверхность оболочки значительной двойной кривизны двояковыпуклой формы в сферической системе координат, в которой положение главных линий кривизны определяются двумя параметрами: углом φ , которому соответствует параллель, и углом β , характеризующим положение меридиана, а направления линий главных кривизн показаны направлениями векторов x_0 и y_0 в касательной плоскости к центральной эллиптической точке O с обозначенной нормалью z .

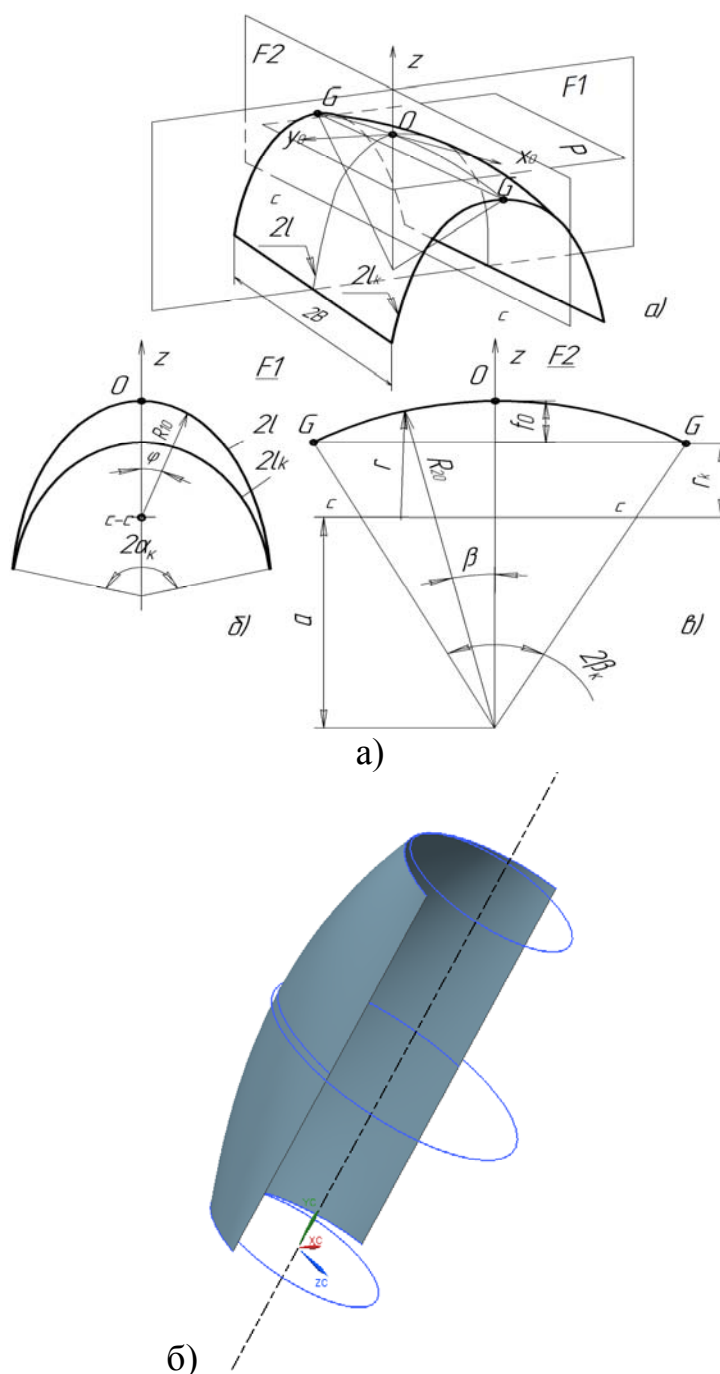


Рис. 1. Поверхность оболочки двояковыпуклой формы значительной двойной кривизны в сферической системе координат (φ, β) : а) оболочка двояковыпуклой формы с эллиптической центральной точкой O ; б) положение оси вращения центрального поперечного контура эллипсоидной поверхности.

Для установления геометрических параметров оболочки направление обтяжки совместим с одной из ортогональных плоскостей симметрии F_1 , которая определяет продольный формообразующий контур сечения

поверхности оболочки, проходящий через центральную точку O поверхности оболочки. Вторая плоскость симметрии F_2 , ортогональная первой, определяет положение центрального поперечного контура $2l$ сечения поверхности оболочки, также проходящего через центральную точку O поверхности оболочки. Для центрального поперечного контура установим цилиндрическую систему координат: r , φ и «мнимую» ось вращения $c-c$ данного контура. Такую систему можно установить отдельно для любого поперечного контура сечения поверхности оболочки, определяемого углом α : r_α , φ_α и «мнимая» ось вращения $c_\alpha-c_\alpha$ контура. Тогда к числу основных геометрических параметров оболочки отнесем:

- радиусы кривизны контуров сечений поверхности плоскостями симметрии F_1 и F_2 в районе центральной точки O : R_{1o} (продольный) и R_{2o} (поперечный);
- длину формообразующего контура продольного сечения поверхности $2l$ в плоскости симметрии F_1 ;
- длина контура краевого сечения поверхности $2l_k$ в плоскости, параллельной F_1 ;
- прогиб центрального контура поперечного сечения поверхности f_o плоскостью симметрии F_2 ;
- продольный $2\alpha_k$ и поперечный $2\beta_k$ углы охвата;
- ширина оболочки $2B$.

Основные геометрические параметры исследуемой оболочки двойной кривизны сведем в таблицу 1, а геометрические параметры оболочки представим на рисунке 2.

Таблица 1 - Геометрические параметры оболочковой детали и заготовки

Геометрический параметр	Значение, мм
Ширина $2B$	2280
Радиус кривизны формообразующего контура в точке O , $R_1^{(A)}$	765
Радиус кривизны контура поперечного сечения в точке O , $R_2^{(A)}$	9187,6
Радиус кривизны формообразующего краевого контура в точке G , $R_1^{(B)}$	694
Радиус кривизны формообразующей в точке E , $R_1^{(C)}$	552
Прогиб в точке O , $f^{(A)}$	71
Длина контура поперечного сечения в точке O , $L_2^{(A)}$	2080
Длина контура продольного сечения формообразующей, в точке O , $L_1^{(A)}$	2286
Длина контура продольного сечения края в точке G , $L_1^{(B)}$	1960
Длина прямого участка схода пуансона, L_C	100
Толщина заготовки, h	2

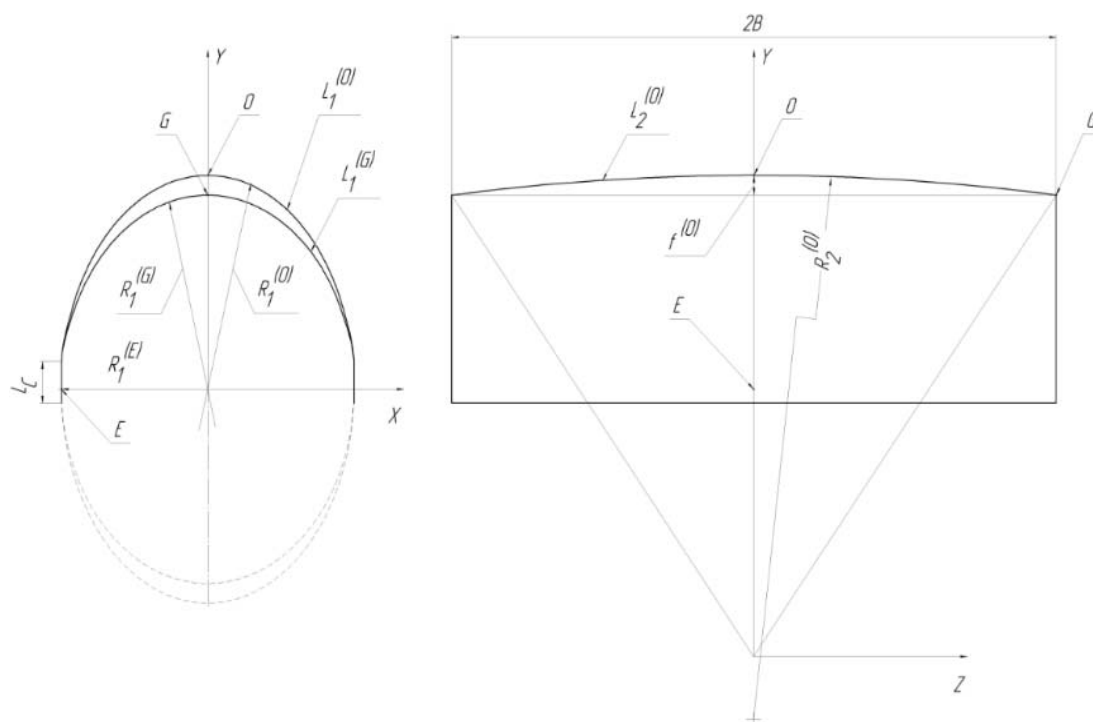


Рис. 2. Основные геометрические параметры оболочки

Построение процесса формообразования обтяжкой оболочки построим на аппроксимации формообразующего контура обтяжного пуансона в форме эллиптической кривой, кривых перемещения листовой заготовки относительно формообразующего контура и на результатах расчета оптимальных деформаций, с использованием аналитической модели обеспечения последовательной обтяжки.

Созданная 3D модель пресса FEKD550-1100 наиболее близка к реальному оборудованию, работа которого совмещает три главных движения: движение подъема стола 1 - ось Y; движение левого балансира 2 - ось X; движение правого балансира 3 - ось Z (рисунок 3). Кроме того, имеется наклон стола пресса в вертикальной плоскости. Эта функция обеспечивается вспомогательной осью «В» или 4-ая ось. Все движения пресса синхронизированы для того чтобы провести свободное обертывание обтяжного пуансона листовой заготовкой. Числовое управление формообразования обтяжкой состоит в программном совмещении главных

движений, в контроле скорости и положении трех главных движений обтяжного пресса.

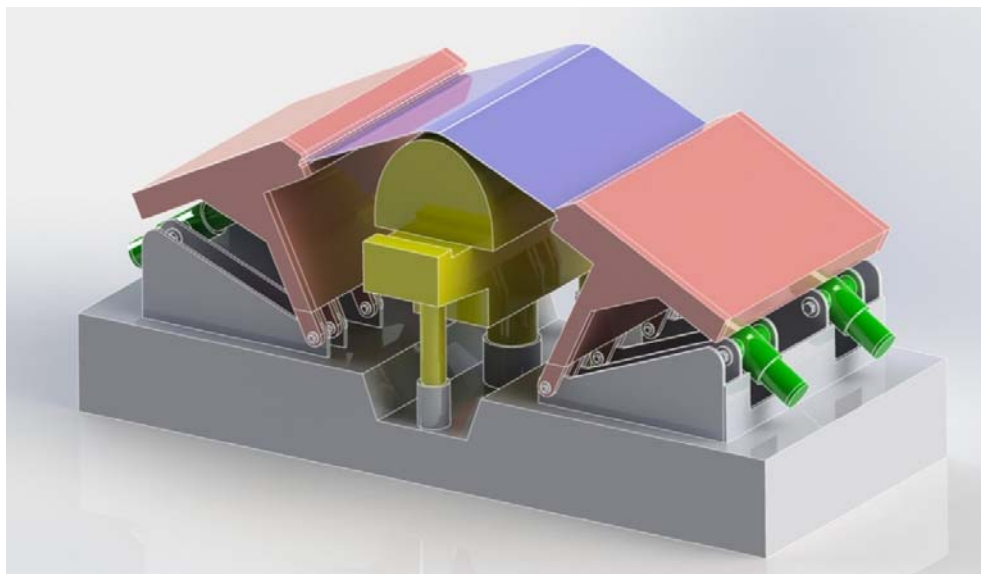


Рис.3. 3D модель пресса FEKD550-1100 с установленной листовой заготовкой в зажимах левого 2 и правого 3 балансиров и обтяжным пуансоном на столе пресса 1

После определения начального положения балансира и стола пресса FEKD 550-1100 можно переходить к непосредственному расчету величин перемещений рабочих органов пресса в процессе обтяжки листовой заготовки по разрабатываемой кинематической схеме, которая предполагает определенную последовательность операций обтяжки, разделенных разгрузкой и разгибанием с разверткой тонколистовой оболочки.

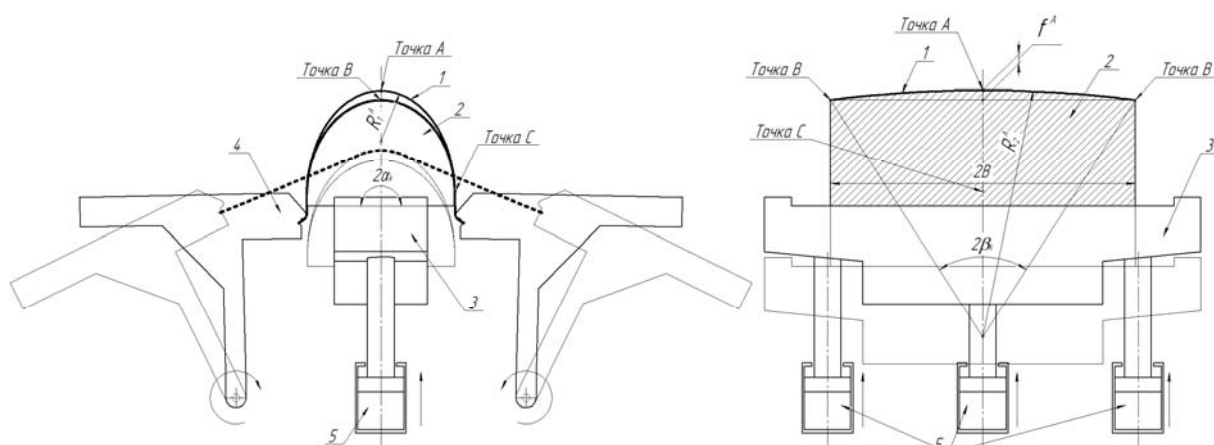
Кроме того, предусмотрена свободная обертка плоской листовой заготовки обтяжного пуансона по формообразующему контуру на полный угол охвата перед первой операцией обтяжки и повторная обертка поверхности оболочки по обтяжному пуансону после второй операции обтяжки. А между операциями обтяжки выполняется развертка поверхности, когда главные кривизны оболочки меняются, а неизменной остается ее гауссова кривизна и получается новая изометрическая форма поверхности оболочки [4].

Приведем перечень кинематических движений, обеспечивающий схему последовательной обтяжки [5]:

- обертка листовой заготовки обтяжного пуансона на полный угол охвата равный 90^0 за счет синхронизации движений балансиров и стола пресса;
- предварительная обтяжка прямолинейной листовой заготовки после ее обертки по формообразующему контуру до полного угла охвата обтяжного пуансона равного 90^0 ;
- разгибание с разверткой детали оболочки на определенный угол, приводящий к получению изометрической формы ее поверхности по отношению к форме поверхности обтяжного пуансона за счет синхронизации движений балансиров и стола пресса;
- повторная обтяжка детали оболочки в другом изометрическом положении ее поверхности под углом разгибания равным 15^0 за счет растяжения боковых свободных от зажимов участков заготовки, которые в новом положении детали оболочки прилегают к поверхности обтяжного пуансона;
- повторная обертка поверхности оболочки по формообразующему контуру обтяжного пуансона после ее разгрузки в положении, определяемом углом равным 15^0 , за счет движений балансиров и стола пресса по заданной траектории.
- калибровочное движение стола пресса для придания поверхности оболочки изначальной двояковыпуклой формы, соответствующей форме обтяжного пуансона.

2. Вычислительный алгоритм аналитической модели обеспечения последовательной обтяжки

Поставленная задача решается за счет способа формообразования последовательной обтяжкой деталей оболочек значительной двойной кривизны двояковыпуклой формы, включающий предварительную и повторную обтяжки. Одним из основных требований, предъявляемых к этому способу, является раздельное и последовательное осуществление этапов формообразования, разделенных разгрузкой без освобождения детали из зажимов пресса.



1 - листовая заготовка; 2 - обтяжной пуансон; 3 - рабочий стол пресса; 4 - балансир; 5 - силовые гидроцилиндры стола пресса.

Рис. 4. - Схема стадии предварительной обтяжки на прессе FEKD 550-1100

На рисунке 4 представлен первый этап формообразования - схема предварительной обтяжки после обертки плоской листовой заготовки по формообразующему контуру обтяжного пуансона на полный угол охвата α_k равным 90° . Листовая заготовка 1 закрепляется в неподвижных прямолинейных зажимных устройствах балансира 4 и изгибается на полный угол охвата α_k обтяжного пуансона 2 за счет синхронизации движений балансиров и стола пресса. Затем выполняется обтяжка при растяжении листовой заготовки для получения геометрической формы участка оболочки в районе поперечного сечения, проходящем через центральную точку поверхности оболочки в точке А, но желательно без избыточного

деформирования плоского участка на сходе листовой заготовки с обтяжного пуансона.

Предварительная обтяжка прямолинейной листовой заготовки после ее обертки по формообразующему контуру обтяжного пуансона на полный угол охвата равного 90^0 сопровождается избыточным деформированием плоского участка листовой заготовки в районе ее схода с обтяжного пуансона по формообразующему контуру в точке C согласно формуле (1):

$$e_u^C = (e^A + e_K - e_H^A) \exp\left(\frac{f \cdot \alpha_k}{n}\right),$$

(1)

где e_u^C - деформация плоского участка схода листовой заготовки с обтяжного пуансона по формообразующему контуру под углом α_k в точке C после получения двояковыпуклой формы в центральном поперечном сечении, соответствующей полному прогибу;

e^A - деформация после получения двояковыпуклой формы в центральном поперечном сечении в точке A , соответствующей полному прогибу;

e_K - деформация калибровки, необходимая для вывода всех участков заготовки за предел текучести материала для фиксации двояковыпуклой формы оболочки;

e_H^A - деформация на стадии нестационарного формообразования двояковыпуклой формы в центральном поперечном сечении, соответствующей неполному прогибу, до момента избыточного деформирования плоского участка листовой заготовки в районе схода с обтяжного пуансона;

f - коэффициент внешнего трения листовой заготовки и обтяжного пуансона;

n - константа упрочнения материала листовой заготовки.

Избыточное деформирование при предварительной обтяжке связано с тем, что формообразование в различных сечениях под углом α заканчивается не одновременно. Однако для оболочки двояковыпуклой формы при наличии плоского участка листовой заготовки в районе схода с обтяжного пуансона и прессы, имеющего прямолинейный ряд зажимных устройств, на данном этапе формообразования, вероятнее всего будет следующее.

Получить избыточную деформацию e_u^C плоского участка несколько меньше деформации формообразования e^A оболочки двояковыпуклой формы, либо без деформации калибровки e_K , либо за счет незначительной деформации калибровки e_K . Это вполне достижимо на стадии нестационарного формообразования двояковыпуклой формы в центральном поперечном сечении, несмотря на влияние внешнего трения при обтяжке тонколистовой оболочки значительной двойной кривизны двояковыпуклой формы. Полученная двояковыпуклая форма детали оболочки соответствует продольному и поперечному радиусам R_1^A и R_2^A линий главных кривизн контуров, проходящих через «полюс» в окрестности точки A и связанных соотношением через гауссову кривизну K^A :

$$R_2^A = \frac{K_0}{R_1^A}, \quad (2)$$

В способе предлагается разгрузить деталь оболочки после предварительной обтяжки и, не освобождая ее из зажимов прессы, осуществить ее разгибание на угол α_p , например, равным 15° за счет синхронизации движений балансиров и стола прессы FEKD по расчетной траектории. Гауссова кривизна при свободном разгибании поверхности сохраняет свое значение, хотя главные кривизны в районе точки A будут меняться. Это понятие играет важную роль в теории тонких оболочек [6].

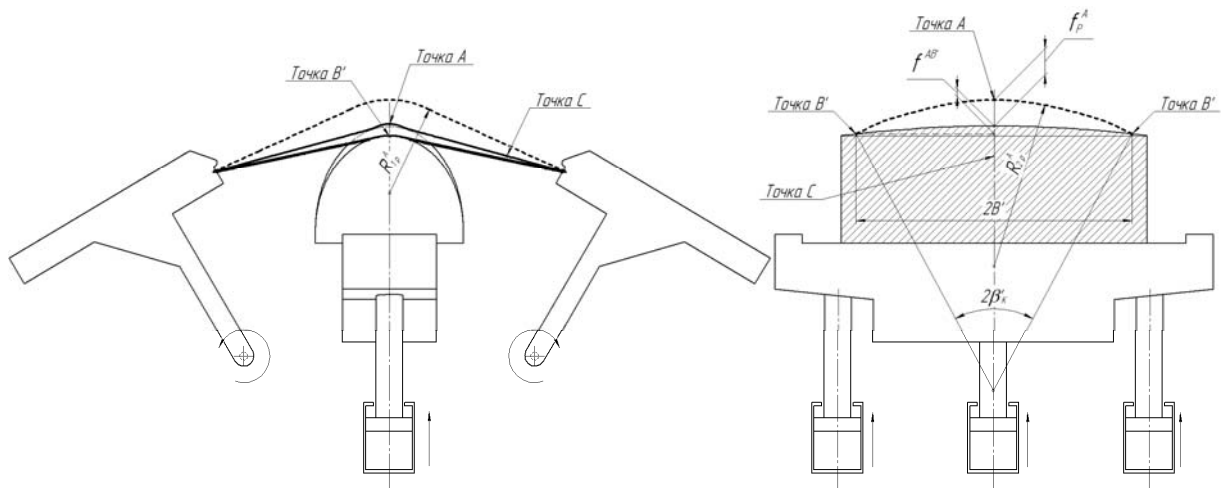


Рис. 5. Схема стадии повторной обтяжки на прессе FEKD 550-1100
 1 - листовая заготовка; 2 - обтяжной пуансон; 3 - рабочий стол пресса;
 4 - балансир; 5 - силовые гидроцилиндры стола пресса.

На рисунке 5 представлено свободное разгибание с разверткой поверхности оболочки после ее разгрузки за счёт синхронизации движений балансиров и стола пресса по соответствующей программе с угла α_k равным 90^0 на угол α_p , например, равным 15^0 . В результате получим, так называемую изометрическую форму поверхности оболочки по отношению к поверхности обтяжного пуансона с радиусами кривизны в точке A соответственно R_1^A и R_2^A связанных соотношением при постоянном значении самой гауссовой кривизны K^A :

$$R_{2p}^A = \frac{1}{K^A R_{1p}^A}, \tag{3}$$

где, если R_{1p}^A при разгибании на угол α_p увеличивается до R_{1p}^A , то R_{2p}^A , наоборот, уменьшается до R_2^A , а поверхность оболочки отступает от поверхности пуансона в районе центрального сечения на величину f_p^A , прилегая к поверхности обтяжного пуансона только боковыми свободными от зажимов участками в окрестности точки B .

Повторная обтяжка детали оболочки в новом положении относительно обтяжного пуансона с угла α_p обеспечивает растяжение боковых практически недеформируемых участков листовой заготовки, которые касаются поверхности обтяжного пуансона. В результате растяжения боковые свободные от зажимов участки заготовки начинают прилегать к поверхности обтяжного пуансона. Данное растяжение сопровождается утонением этих участков, и создаются условия выравнивания толщины оболочки в поперечном направлении до момента повторного формообразования центрального поперечного сечения оболочки.

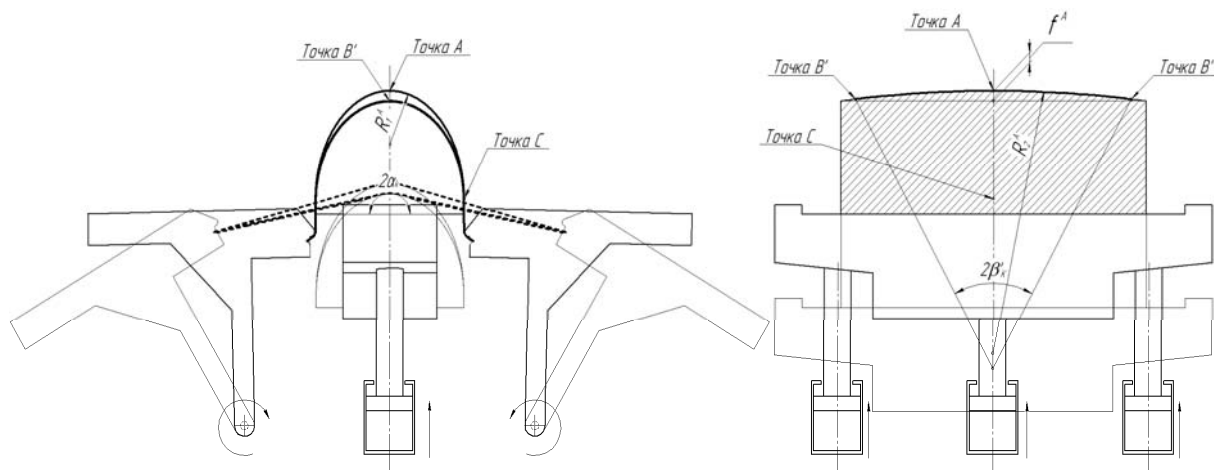


Рис. 6. Схема разгрузки и изгибания на прессе FEKD 550-1100 оболочки с полным охватом обтяжного пуансона: 1 - листовая заготовка; 2 - обтяжной пуансон; 3 - рабочий стол прессы; 4 - балансиры; 5 - силовые гидроцилиндры стола прессы

Повторная обертка поверхности оболочки по формообразующему контуру обтяжного пуансона после ее разгрузки в положении, определяемом углом α_p на полный угол охвата обтяжного пуансона, обеспечивает фиксацию двояковыпуклой формы при обратном изменении значений радиусов R_{1p}^A и R_{2p}^A на значения радиусов R_1^A и R_2^A линий кривизн контуров в точке A.

При этом избыточное деформирование других участков готовой оболочки, постепенно прилегаемых к поверхности обтяжного пуансона,

будет отсутствовать. В результате поверхность оболочки будет соответствовать форме обтяжного пуансона, с гауссовой кривизной в точке A , соответствующей произведению R_1^A и R_2^A без избыточного деформирования плоского участка детали оболочки на сходе с обтяжного пуансона. Деформация, которая обеспечивает получение двояковыпуклой формы детали оболочки в районе «полюса» в точке A на первом этапе формообразования при предварительной обтяжке, равна:

$$e^A = \ln \left(\frac{R_1^A}{R_1^A - f^A} \right), \quad (4)$$

где R_1^A - продольный радиус линии кривизны контура, проходящего через точку A ;

f_ϕ^A - прогиб поверхности оболочки в центральном поперечном сечении, равный: $f_\phi^A = R_2^A (1 - \cos \beta_k)$, где R_2^A - поперечный радиус линии контура, проходящего через точку A , а β_k - поперечный угол охвата пуансона при формообразовании второй кривизны в поперечном сечении под углом $\alpha = 0$ в точке A . Первоначально плоской заготовке после ее обертки по формообразующему контуру обтяжного пуансона на угол α_1 можно дать деформацию растяжения в точке A , соответствующей нестационарному деформированию листовой заготовки:

$$e_\phi^A = \ln \left(\frac{R_1^A}{R_1^A - f_\phi^A} \right), \quad (5)$$

где $f_\phi^A = R_2^A (1 - \cos \beta_k^\phi)$ - величина прогиба отформованной части заготовки в поперечном сечении под углом $\alpha = 0$ в в точке A при нестационарном деформировании листовой заготовки; $\beta_k^\phi = \left(\frac{B}{2R_2^A \exp \mu \alpha^1} \right)$ - угловая координата отформованной части заготовки в поперечном сечении под углом α .

Последующий расчет по формуле (1) без деформации калибровки позволит выполнить оценку величины избыточной деформации e_H^C с целью корректировки кинематической схемы формообразования обтяжкой оболочки при сохранении в районе зоны наибольших деформаций в центральной части листовой заготовки. При таком условии, которое обеспечивает получение двояковыпуклой формы оболочки, характеризуемое определенным значением гауссовой кривизны в точке A , осуществляется разгибание с разверткой поверхности оболочки. В результате радиус R_1^A увеличивается до значения R_{1p}^A , а радиус R_2^A , наоборот, уменьшается до значения R_{2p}^A при сохранении величины гауссовой кривизны K^A .

Область оболочки в окрестности точки A приподнимается над поверхностью обтяжного пуансона на величину f_p^A . Эта величина определяется из условия равенства толщины стенки детали оболочки в точках A и B , причем новое изометрическое положение поверхности оболочки относительно поверхности обтяжного пуансона обеспечивается деформированием свободных боковых участков при обтяжке оболочки с угла разгиба α_p до величины:

$$e_1^B = \frac{e_1^A \left(1 + \mu_{21} m^A \left(\frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) - \mu_{21} \right)}{(1 - \mu_{21} m^A)(1 - \mu_{21})}, \quad (6)$$

где μ_{21} и μ_{12} - показатели анизотропии листовой заготовки;

$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ отношение главных напряжений» в точке A , определяемое по

формуле: $m^A = \frac{R_2^A}{r_k} \left(e^{-\mu \beta_k} (\cos \beta_k + 2\mu \sin \beta_k) - 1 \right)$, где $r_k = R_1^A - f^A$.

В результате величину подъема оболочки в окрестности точки A можно определить по формуле: $f_p^A = R_1^A (\exp e_1^B - 1) + f^{AB'}$. В формуле неизвестны величины f_p^A и $f^{AB'}$. Величина $f^{AB'}$ отмечается положением точки B' , связанной со смещением точки B на боковой кромке свободной от зажимов участка оболочки. Однако их разность вполне определяется из формулы. Для этого была организована процедура необходимых вычислений в Microsoft Excel.

На втором этапе формообразования при повторной обтяжке, выполняется растяжение боковых свободных от зажимов участков оболочки, полученной в результате разгибания с разверткой, в новом изометрическом положении по отношению к поверхности обтяжного пуансона, то есть под углом α_p . При этом обеспечивается деформирование не участка оболочки в окрестности точки A , а боковых свободных от зажимов участков в окрестности точки B , имеющих в данный момент контакт с обтяжным пуансоном. Необходимая величина угла разгибания с разверткой поверхности оболочки задается не по формообразующему контуру, а по краевому сечению обтяжного пуансона. Перед определением α_p необходимо установить выражения для радиусов R_{1p}^A и R_{2p}^A после разгибания с разверткой:

$$R_{2p}^A = \frac{(f_p^A + f^A)^2 + B^2}{2(f_p^A + f^A)} \text{ и } R_{1p}^A = \frac{R_1^A R_2^A}{R_{2p}^A} \quad (7)$$

Мы приняли аппроксимацию формообразующего контура обтяжного пуансона в форме эллиптической кривой. Поэтому для определения величин полуосей эллипса, измененных после разгибания с разверткой линии l_k на угол α_p , воспользуемся его параметрическим уравнением в системе координат, начало которой совмещено с центром эллипса:

$$X = a \cdot \cos \phi, Y = b \cdot \cos \phi + c; \quad (8)$$

В вершине эллипса, где $\varphi = \frac{\pi}{2}$, имеем радиус ρ_α и его центр кривизны:

$\rho_\alpha = \frac{a^2}{b}$, $X_c = 0$, $Y_c = -\frac{a^2 - b^2}{b}$; откуда: $a = \sqrt{\rho_\alpha \cdot b}$. Учитывая, что длина оболочки после разгиба не изменилась, определим угол разгиба детали по линии l_k торцевого сечения:

$$\alpha_p = 2\pi \frac{l_k}{L_{эл}}, \quad (9)$$

где $L_{эл}$ - длина эллипса, выраженная через эллиптический интеграл, если известны размеры полуосей. По таблицам интегралов находим выражение для длины эллипса через полный эллиптический интеграл второго рода: $L_{эл} = \pi [1,5 \cdot (a+b) - \sqrt{a \cdot b}]$. Далее определим координаты точки D по касательной к линии l_k и под углом α_p : $X_D = a \cdot \sin \alpha_p$, $Y_D = b \cdot \cos \alpha_p + c$.

Проведем касательную к контуру l_k торцевого сечения через точку D и решим совместно уравнения эллипса и прямой для определения координат точки C касания:

$$Y_c = \frac{M - \sqrt{M^2 - 4T \cdot N}}{2T}; \quad X_c = a \cdot \sqrt{1 - \frac{Y_c^2}{b^2}}, \quad (10)$$

где $T = (Y_D + c)^2 + \frac{X_D^2 \cdot b^2}{a^2}$; $M = 2b^2(Y_D + c) + 4c(Y_D + c)^2 - 2\frac{c \cdot X_D^2 \cdot b^2}{a^2}$;

$$N = [b^2 + c(Y_D + c)]^2 - \frac{X_D^2 \cdot b^4}{a^2} + \frac{c \cdot X_D^2 \cdot b^2}{a^2}.$$

Окончательно получим угол α'_p схода заготовки по касательной в торцевом сечении пуансона: $\alpha'_p = \arctg \frac{X_c}{Y_c}$.

Деформирование оболочки в новом положении, полученное в результате разгибания с разверткой и фиксирования под углом α_p , осуществляется от боковых участков в окрестности точки B , имеющих в данный момент контакт с обтяжным пуансоном.

Предварительные расчеты по аналитическим формулам обеспечивают подготовку кинематической модели обтяжного прессы FEKD 550-1100, связанной с расположением зажимных устройств балансиров, стола прессы с обтяжным пуансоном, а также обеспечивает расчет перемещений по каждой из координат системы управления прессом для всех этапов формообразования обтяжкой. Так как обтяжной пуансон является прототипом детали оболочки, то геометрические параметры оболочки можно рассматривать так же как размеры пуансона. При этом радиусы кривизн линий контуров, пересекающихся в точке A оболочки соответственно равны: продольный по формообразующему контуру $R_{1p}^A = 766 \text{ мм}$, а поперечный по второй кривизне $R_{2p}^A = 9187,6 \text{ мм}$. Прогиб поперечного контура оболочки в точке O равен $f^A = 71 \text{ мм}$. Длина формообразующего контура обтяжного пуансона равна 2616 мм, а ширина листовой заготовки равна 2280 мм. Для выполнения расчетов было организована процедура необходимых вычислений в Microsoft Excel. Был создан блок ввода данных, куда, кроме геометрических параметров, были заведены сочетания показателей анизотропии (рисунок 7). Кроме этого в Microsoft Excel располагаем блоком аналитических формул и блоком промежуточных расчетов при различных сочетаниях показателей анизотропии и коэффициента трения (рисунок 8).

Блок ввода данных				
Параметр	Обозначение	Значения		
Продольный радиус	R_1^A	766		
Поперечный радиус	R_2^A	9187,6		
Прогиб	f^A	71		
Ширина	B	1140		
Трение	μ	0,1	0,2	0,3
Угол первой обтяжки	α	90		
Коэффициенты анизотропии	μ_{21}	0,36	0,392	0,42
	μ_{12}	0,39	0,48	0,472
Полуоси главного эллипса	a	552		
	b	695		

Рис.7. Блок ввода данных в Microsoft Excel

Блок аналитики		Блок промежуточных расчетов									
0		μ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		μ_{21}	0,36	0,392	0,42	0,36	0,392	0,42	0,36	0,392	0,42
		μ_{12}	0,39	0,48	0,472	0,39	0,48	0,472	0,39	0,48	0,472
1	$e^A = \ln\left(\frac{R_1^A}{R_1^A - f^A}\right)$	e^A	0,0973	0,0973	0,0973	0,0973	0,0973	0,0973	0,0973	0,0973	0,0973
2	$f_o^A = R_2^A \left(1 - \cos\left(\frac{B}{R_2^A \exp(\mu\alpha)}\right)\right)$	f_o^A	51,610	51,610	51,610	44,114	44,114	44,114	37,706	37,706	37,706
3	$e_o^A = \ln\left(\frac{R_3^A}{R_1^A - f_o^A}\right)$	e_o^A	0,0698	0,0698	0,0698	0,0593	0,0593	0,0593	0,0505	0,0505	0,0505
4	$e^E = (e^A - e_o^A) \exp\left(\frac{\mu\alpha}{0,26}\right)$	e^E	0,0503	0,0503	0,0503	0,0939	0,0939	0,0939	0,1567	0,1567	0,1567
5	$\beta_k = \frac{B}{R_2^A}$	β_k	7,1093	7,1093	7,1093	7,1093	7,1093	7,1093	7,1093	7,1093	7,1093
6	$r_k = R_1^A - f^A$	r_k	695	695	695	695	695	695	695	695	695
7	$m^A = \frac{R_2^A}{r_k} \left(e^{-\mu\beta_k} (\cos\beta_k + 2\mu\sin\beta_k) - 1\right)$	m^A	0,060	0,060	0,060	0,138	0,138	0,138	0,215	0,215	0,215
8	$e_1^E = \frac{e_1^A \left(1 + \mu_{21} m^A \left(\frac{1}{\mu_{12}} - 1\right) - \mu_{21}\right)}{(1 - \mu_{21} m^A)(1 - \mu_{21})}$	e_1^E	0,1046	0,1046	0,1046	0,1128	0,1128	0,1128	0,1256	0,1256	0,1256
9	$f_p^A = R_1^A (\exp e_1^E - 1) + f^A$	f_p^A	155,497	155,497	155,497	162,445	162,445	162,445	173,496	173,496	173,496
10	$R_{2p}^A = \frac{(f_p^A + f^A)^2 + B^2}{2(f_p^A + f^A)}$	R_{2p}^A	2982,159	2982,159	2982,159	2900,252	2900,252	2900,252	2779,956	2779,956	2779,956
11	$R_{1p}^A = \frac{R_1^A R_{2p}^A}{R_{2p}^A}$	R_{1p}^A	2359,935	2359,935	2359,935	2426,583	2426,583	2426,583	2531,587	2531,587	2531,587
12	$L_k = \pi \left(1,5(a+b) - \sqrt{ab}\right)$	L_k	3928,495	3928,495	3928,495	3928,495	3928,495	3928,495	3928,495	3928,495	3928,495
13	$a_p = R_{1p}^A$	a_p	2359,935	2359,935	2359,935	2426,583	2426,583	2426,583	2531,587	2531,587	2531,587
14	$b_p = R_{2p}^A - f^A - f_p^A$	b_p	2133,438	2133,438	2133,438	2193,138	2193,138	2193,138	2287,091	2287,091	2287,091
15	$L_{an} = \pi \left(1,5(a_p + b_p) - \sqrt{a_p b_p}\right)$	L_{an}	14118,161	14118,161	14118,161	14515,189	14515,189	14515,189	15140,394	15140,394	15140,394
16	$\alpha_p = 2\pi \frac{\sqrt[4]{L_k}}{L_{an}}$	α_p	0,4369	0,4369	0,4369	0,4249	0,4249	0,4249	0,4074	0,4074	0,4074
17	$X_p = a_p \sin \alpha_p$	X_p	998,492	998,492	998,492	1000,345	1000,345	1000,345	1003,004	1003,004	1003,004
18	$Y_p = b_p \cos \alpha_p$	Y_p	1933,071	1933,071	1933,071	1998,110	1998,110	1998,110	2099,929	2099,929	2099,929

Рис. 8. Блок аналитики и блок промежуточных расчетов в Microsoft Excel

Были проанализированы различные сочетания показателей анизотропии на базе вычислительного алгоритма аналитической модели обеспечения последовательной обтяжки. Выбраны те сочетания показателей анизотропии, которые снижают вероятность преимущественного развития

деформации по толщине заготовки с учетом особенностей реологического состояния деформированного листового материала. Разработана кинематическая модель последовательной обтяжки оболочки двояковыпуклой формы на обтяжном прессе типа FEKD550-1100 с использованием программных средств ANSYS/LS-DYNA.

Заключение

Основой данного метода исследований является организация поддержки аналитических расчетов методами конечных элементов на всех этапах моделирования. Методы конечных элементов (МКЭ) в настоящее время являются одним из наиболее мощных вычислительных инструментов структурного анализа. Однако, для построения адекватной конечно-элементной модели, проведения расчетов и корректной интерпретации результатов в терминах предметной области необходимы знания не только о геометрической и физической сущности технологической задачи, но и о вычислительных алгоритмах. Помимо реализации вычислительного алгоритма аналитической модели обеспечения последовательной обтяжки необходимо построить модель объекта пригодную для расчета, выбрать алгоритм и значения начальных параметров и интерпретировать результаты расчета в терминах решаемой задачи.

Эти задачи являются слабоформализуемыми и требуют значительного опыта и экспертных знаний. Проблема поиска оптимальных решений, по-прежнему, остается. Подавляющее большинство процессов и систем являются стохастическими из-за неопределенности значений начальных параметров, включая реологические или механические характеристики деформируемого материала, внешних параметров трения, выбор которых остается сложным из-за отсутствия необходимой информации. В связи с этим актуальным считается создание интеллектуальной CAE-системы, включающей в себя экспертную систему для поддержки решения

перечисленных выше задач, интегрированную с программой аналитических расчетов методами конечных элементов.

Библиографический список

1. Сипливая М. Б. Организация интеллектуальной поддержки принятия решений в процессе инженерного анализа [Текст] / М.Б. Сипливая, И.Г. Жукова, Р.Ю. Сливин // Известия Волгоградского гос. технич. ун-та, 2006, №4, С. 69-71.

2. Технология и оборудование для формообразования обшивок одинарной и двойной кривизны [Текст]: Реферативная подборка по материалам зарубежной печати / НИАТ. - М., 1988. - 28 с.

3. Филин, А.П. Элементы теории оболочек [Текст] / А.П. Филин. - Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние. - 3-е изд., перераб. и доп., 1987. - 384 с.

4. Михеев, В.А. Совершенствование процессов формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны [Текст] / В.А. Михеев, А.А. Кузина, А.Ф. Гречникова // Известие Самарского центра РАН. - 2011. - Т. 13, №4. - С. 217-224.

5. Способ формообразования обтяжкой тонколистовых деталей оболочек значительной двойной кривизны двояковыпуклой формы. Авторы: В.А. Михеев, Д.В. Савин, С.В. Судидин. Заявка: 2014102822/02, 28.01.2014 Приоритет(ы): Дата подачи заявки: 28.01.2014 Дата публикации заявки: 10.08.2015 Бюл. № 22.

6. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. - М.: Наука, 1976. - 512 с.

УДК 621.981

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

Морозов О.И.¹, Табаков В.П.², Кокорин В.Н.³

1 – старший преподаватель кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО УлГТУ, г. Ульяновск.

2 – д.т.н., профессор, зав. Кафедры «Инновационные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО УлГТУ, г. Ульяновск.

3 – д.т.н., профессор, зав. Кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО УлГТУ, г. Ульяновск.

Аннотация. Рассмотрены вопросы математического моделирования процессов износа штампового инструмента с износостойкими покрытиями на основе нитрида титана.

Ключевые слова: стойкость, эффективность, покрытие, ионно-плазменное напыление, нитрид титана, моделирование, математическая модель, LS-Dyna, износ, напряженно-деформированное состояние.

MODELING THE WEAR OF A SHEET STAMPING TOOL WITH A WEAR-RESISTANT COATING

Morozov O.I.¹, Tabakov V.P.², Kokorin V.N.³

1 – Senior lecturer of the Department "Materials Science and Metal Processing by Pressure" of the Federal State Budgetary Educational Institution of UlSTU, Ulyanovsk.

2 – Doctor of Technical Sciences, Professor, head. Department of "Innovative Technologies in Mechanical Engineering" FGBOU IN UlSTU, Ulyanovsk.

3 – Doctor of Technical Sciences, Professor, head. Department of "Materials Science and metal processing by pressure" FGBOU IN UlSTU, Ulyanovsk.

Abstract. The issues of mathematical modeling of the processes of wear of a die tool with wear-resistant coatings based on titanium nitride are considered.

Keywords: durability, efficiency, coating, ion-plasma spraying, titanium nitride, modeling, mathematical model, LS-Dyna, wear, stress-strain state.

Рабочий инструмент штампов (пуансоны и матрицы) работает в тяжелых условиях ударных и знакопеременных нагрузок, высоких значений сил трения, контактных нагрузок, что приводит к интенсивному износу его рабочих поверхностей.

Основным фактором, влияющим на износ рабочей поверхности штампового инструмента, является напряженно-деформированное состояние (НДС) инструментального материала в очаге деформации. Одним из инструментов для изучения особенностей НДС является построение математических моделей с использованием программной среды LS-Dyna.

Было проведено моделирование двух процессов листовой штамповки: вытяжка с утонением (формоизменяющие операции) и вырубка (разделительные операции). При разработке математических моделей использовали программные продукты КОМПАС-3D и LS-Dyna.

Для определения величины износа ШИ использовали закон Джона Ф. Арчарда [12], который заложен в расчетном модуле «Wear Process» пакета LS-Dyna. Учитывая, что материал ИП отличается от материала ШИ по своим механическим свойствам и механизму изнашивания, его моделирование выполнялось отдельно. Для этого была выбрана модель Джонсона-Холмквиста [13], учитывающая образование трещин в хрупком материале.

При численном моделировании процесса изнашивания ШИ при вытяжке с утонением исследовали влияние ИП на износ рабочей поверхности, контактные касательные (τ) и нормальные (σ) напряжения и стойкость (N) ШИ. Установлено, что нанесение ИП уменьшает величину контактных напряжений в 1,4-2 раза, в зависимости от состава покрытий. При этом в большей степени уменьшаются контактные касательные напряжения, а большее снижение имеет место при нанесении покрытия TiZrN. По сравнению с покрытием TiN оно составило 5 % и 16 %, соответственно, для нормальных и касательных напряжений.

Нанесение ИП снижает длину изношенной зоны ($b_{и}$) и максимальную глубину износа ($a_{и}$). Так, после 600000 циклов работы ШИ с ИП длина изношенной зоны меньше в 1,25 раза, а максимальная глубина износа на 30%. При этом максимальное снижение износа наблюдалось при использовании покрытия TiZrN. Повышение стойкости ШИ при нанесении покрытий при глубине износа, равной 0,15 мм, составило 30%.

При численном моделировании процесса изнашивания ШИ на операции вырубка исследовали влияние ИП износ рабочей поверхности, контактные касательные (τ) и нормальные (σ) напряжения при различной величине межинструментального зазора и стойкость (N) ШИ.

Установлено, что нанесение ИП уменьшает величину контактных касательных напряжений на 30% и нормальных напряжений на 7% (рис. 8). При этом, как и в случае с операцией «вытяжка с утонением», большее снижение значений контактных напряжений имело место при использовании покрытия TiZrN.

Нанесение ИП снижает износ рабочих поверхностей ШИ (рис. 9). Так, после 400000 циклов работы ШИ снижение износа рабочих поверхностей по цилиндрической (Iц) и торцовой (It) поверхностям составило (11-28) %, а глубины износа ($a_{и}$) – (23-27) %. Повышение стойкости ШИ при нанесении ИП при глубине износа $a_{и} = 0,1$ мм составило 1,22-1,26 раза. При этом, наибольшее снижение износа рабочей поверхности и повышение стойкости ШИ наблюдалось при нанесении покрытия TiZrN.

Сотрудниками машиностроительного факультета УлГТУ совместно с АО «Ульяновский патронный завод» и АО «Ульяновский НИАТ» были проведены экспериментальные испытания штампового инструмента с ИП. Отклонение результатов моделирования и эксперимента не превышают 4 и 13 %, для операций вытяжки с утонением и вырубки, соответственно.

Выводы.

1. Разработаны математические модели разрушения ИП и изнашивания рабочих поверхностей ШИ с ИП на операциях вытяжки и вырубки, учитывающие особенности разрушения хрупкого материала ИП и формирования зон разрушения в условиях ударных и сдвиговых нагрузок.

2. Проведено численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей ШИ и разрушения ИП с использованием программных комплексов КОМПАС-3D и LS-Dyna. Результаты исследований, полученных численным моделированием, подтверждены экспериментальными данными. Отклонения результатов моделирования и эксперимента не превышают 13%.

3. На основе результатов численного моделирования установлено влияние ИП на контактные напряжения, износ рабочих поверхностей и стойкость ШИ. Установлено, что на операции вытяжки нанесение ИП уменьшает величину контактных напряжений в 1,4-2 раза, снижает износ рабочих поверхностей на (25-30) % и повышает стойкость ШИ на 30%; на операции вырубки снижение контактных напряжений составило до 30 %, износа рабочих поверхностей (11-28) % и повышение стойкости ШИ в 1,22-1,26 раза. При этом, наибольшую эффективность независимо от вида операции имеет покрытие TiZrN.

4. Результаты численного моделирования подтверждены экспериментальными данными.

Библиографический список

1. *Табаков В.П.* Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия: диссертация на соискание степени доктора технических наук : 05.03.01. - Ульяновск, 1992. - 584 с. : ил.

2. *Морозов О.И.* Повышение стойкости штампового инструмента с износостойким покрытием на формоизменяющих операциях, Табаков В.П., Кокорин В.Н., Корняков Е.Л., Морозов О.И., Алешин А.С., Сагитов Д.И.// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 6. С. 352-358.

3. *Морозов О.И.* Моделирование напряженно-деформированного состояния штампового инструмента с износостойким покрытием на разделительных операциях листовой штамповки с использованием программного пакета LS-DYNA, Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н., Илюшкин М.В., Титов Ю.А., Сагитов Д.И.// Вестник Пермского

национального исследовательского политехнического университета. *Машиностроение, материаловедение*. 2020. Т. 22. № 3. С. 5-11.

4. *Морозов О.И.* Моделирование процесса предварительной механической активации подложки композиции покрытие - металл и исследование напряженного и деформированного состояния рабочих поверхностей штампового инструмента, Табаков В.П., Кокорин В.Н., Морозов О.И., Алешин А.С., Аль К.М.Ф.Д., Сагитов Д.И. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019. Т. 15. № 11 (179). С. 523-528.

5. *Морозов О.И.* Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов при использовании комплексной модификации, Морозов О.И., Кокорин В.Н., Табаков В.П., Сагитов Д.И., Илюшкин М.В., Ширманов Н.А.// *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. № 3. С. 317-326.

6. *Морозов О.И.* Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из теплостойких сталей, Табаков В.П., Кокорин В.Н., Титов Ю.А., Морозов О.И.//*Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 11-1. С. 64-68.

7. Improvement of the working surface resistance of a stamping tool with coating and SSS modeling of the preliminary mechanical activation of the surface layer of the stamp working parts, Tabakov V.P., Kokorin V.N., Morozov O.I., Titov Y.A., Ilyushkin M.V., Korniyakov E.L. // *Всборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 21, Technologies, Innovation, Quality. Сер. "XXI International Scientific and Research Conference on Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, Metallurgy 2019" 2020. С. 012049.

8. Моделирование напряженно-деформированного состояния материала инструментальной оснастки процессов ОМД с износостойким ионно-плазменным покрытием / О. И. Морозов, В. П. Табаков, В. Н. Кокорин, М. В. Илюшкин // *Инновационные технологии в машиностроении* :

Международная научно-практическая заочная конференция, Ульяновск, 30 ноября 2020 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2020. – С. 227-232.

9. *John F. Archard*. Contact and Rubbing of Flat Surface, *J. Appl. Phys.* 24 (8):981-988, 1953.

10. Simulation of Wear Processes in LS-DYNA®, Thomas Borrvall, Anders Jernberg and Mikael Schill, 14th International LS-DYNA Users Conference, June 12-14, 2016.

11. Research on Tribological Characteristics of Hard Metal WC-Co Tools with TiAlN and CrN PVD Coatings for Processing Solid Oak Wood? Deividas Kazlauskas, Vytenis Jankauskas, and Simona Tuckute, *Coatings* 2020, 10, 632; doi:10.3390/coatings10070632

12. *Табачков В.П.* Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия: диссертация на соискание степени доктора технических наук: 05.03.01. - Ульяновск, 1992. - 584 с. : ил.

УДК 621.771.63

**КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ПРОДОЛЬНОГО ГОФРИРОВАНИЯ ТРУБ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ
КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ШАРИКОВОЙ
ФИЛЬЕРЫ В ПРОГРАММЕ LS-DYNA**

Поворов С.В.¹, Бузаев Д.А.²

1 – к.т.н., доцент каф. «Оборудование и технологии прокатки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

2 – аспирант 3 года каф. «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация. В статье представлены результаты конечноэлементного моделирования в программе LS-Dyna процесса продольного гофрирования труб круглого сечения из коррозионностойкой стали AISI 304 шариковыми фильерами. Трубы такого профиля являются заготовками для получения щелевых фильтрующих труб методом деформирующего резания. К заготовкам предъявляются требования по постоянству высоты гофров в пределах профиля. В результате моделирования установлена зависимость разницы высот гофров от глубины внедрения шариков в материал, для труб круглого сечения с наружным диаметром 35 мм и толщинами стенок 0,35 мм, 0,5 мм и 0,6 мм. Установлены интервалы глубин внедрения, при которых разность высот гофров не превышает 0,1 мм.

Ключевые слова: продольно гофрированные трубы, звездообразные трубы, профильные трубы, шариковые фильеры, коррозионностойкая сталь, LS-Dyna.

**FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE PROCESS OF
LONGITUDINAL CORRUGATIONS FORMING ON STAINLESS STEEL
TUBES OF CIRCULAR SECTION BY MEANS OF BALL DIES IN LS-DYNA**

Povorov S.V.¹, Buzaev D.A.²

1 – PhD, docent, Department of Equipment and Technology of Rolling, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

2 – 3rd year postgraduate student, Department of Instrument Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Abstract. The article presents the results of finite element simulation of the process of longitudinal corrugations forming on AISI 304 stainless steel tubes of circular section by means of ball dies in LS-Dyna. Tubes of such cross section serve as workpieces for screen tubes by means of Deformational Cutting method. There is a requirement for the constancy of the corrugations height within the section. As a result of simulation, the dependence of the corrugations height difference on the depth of balls penetration into the material is established for tubes with an outer diameter 35 mm and wall thicknesses 0.35, 0.5 and 0.6 mm. Intervals of penetration depths are established, at which the height difference does not exceed 0.1 mm.

Keywords: fluted tubes, longitudinally corrugated tubes, star shaped tubes, profile tubes, ball dies, stainless steel, LS-Dyna.

Одним из перспективных методов получения щелевых фильтрующих элементов является сквозное прорезание тонкостенных профильных труб

методом деформирующего резания (ДР). Данный метод обладает преимуществами по тонкости фильтрации получаемых фильтров, по сравнению с одними традиционными методами получения, и по производительности и энергоемкости (и как следствие себестоимости), – по сравнению с другими [1].

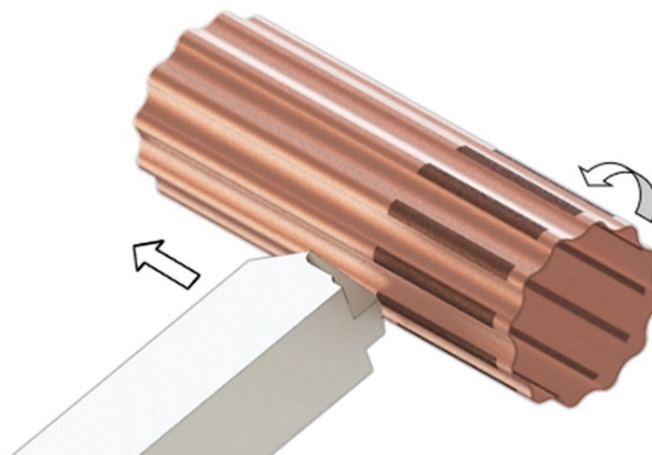


Рис. 1. Прорезание щелей на продольно гофрированной трубе методом ДР

Для получения фильтрующих труб методом ДР необходимы заготовки некруглого сечения, позволяющие прорезать участки стенок насквозь без потери конструктивной прочности заготовки, например продольно гофрированные (звездообразные), квадратные и многогранные трубы, витые трубы и трубы с внутренним продольным оребрением.

Сварные продольно гофрированные трубы (Рис. 1) успешно использовались для получения щелевых структур методом ДР [1], однако процесс их получения достаточно энергоемок и требует наличия специального оборудования для получения гофрированных лент и сварки их в трубы. Существующие технологии получения гофрированных труб путем холодной деформации труб круглого сечения (волочением) [2, 3] также

требуют предварительного изготовления достаточно дорогостоящих профильных матриц.

На предыдущих этапах исследования было апробировано и признано целесообразным использование в качестве заготовок для металлических фильтров продольно гофрированных (звездообразных) труб, полученных из стандартных труб круглого сечения с помощью шариковых фильер (Рис. 2) [4].

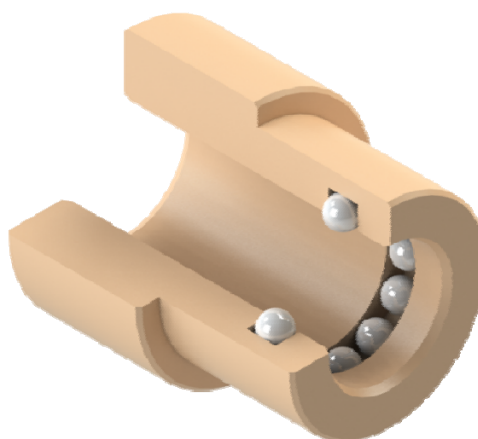


Рис. 2. Условное изображение шариковой фильеры в разрезе

Полученные с их помощью продольно гофрированные трубы служат заготовками для следующего этапа – прорезания гофров методом ДР и получения щелевой структуры (см. Рис. 3).

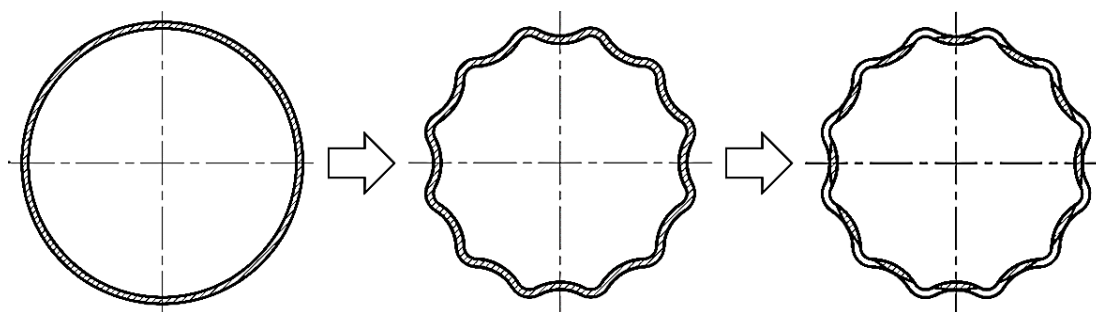


Рис. 3. Этапы получения щелевых труб

Для расширения номенклатуры получаемых гофрированных профилей и реализации многопроходной схемы гофрирования ведется разработка регулируемой конструкции фильеры, в которой шарикам фильеры придается дополнительной степени свободы – перемещения в радиальном направлении, что позволяет плавную регулировку высоты гофр посредством изменения глубины внедрения шариков в трубную заготовку.

Основное требование к высоте гофра h для последующего прорезания щелей (см. Рис. 4):

$$h \geq 2 \cdot t, \quad (1)$$

где t – толщина исходной трубы круглого сечения.

Данное требование обусловлено необходимостью сквозного прорезания стенки заготовки для формирования щелевого зазора при сохранении конструктивной прочности трубы – впадины гофров не прорезаются и служат её каркасом.

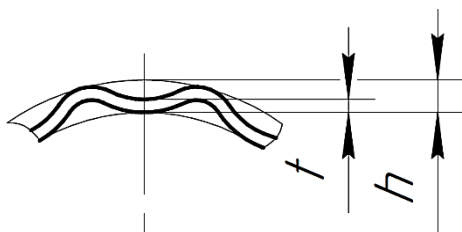


Рис. 4. Профиль гофров

Наиболее интересны в качестве заготовок для фильтров трубы из коррозионностойкой стали, обеспечивающие высокую конструкционную прочность и способные работать в агрессивной среде. Однако физико-механические свойства сталей сужают интервал допустимых глубин резания при ДР по сравнению с медными, титановыми и алюминиевыми сплавами.

В связи с этим к заготовкам из коррозионностойкой стали предъявляются повышенные требования по равномерности высоты гофров, образующих профиль каждой трубы: так как формирование профиля шариками происходит по впадинам, а прорезание щелей методом ДР производится в выступах гофров на токарном оборудовании, разноравнотность гофров означает колебания глубины резания, в связи с чем возможно превышение допустимой глубины резания на одних гофрах (и отрыв стенок получаемых щелей) при отсутствии сквозного прорезания на других гофрах профиля (рис. 5).

Разноравнотность гофров Δ определяется как разность между максимальной и минимальной высотой гофров для данного профиля. Приемлемая для получения фильтров из коррозионностойкой стали разноравнотность гофров по оценке составляет не более 0,05...0,1 мм.

Первые эксперименты с гофрированием труб шариковыми фильерами позволили предположить, что одним из факторов влияния на разноравнотность получаемых гофров является глубина внедрения шариков фильеры в трубную заготовку. Целью данной работы является построение зависимости между глубиной внедрения шариков в заготовку и точностью получаемых гофров по высоте, а также определение допустимых диапазонов глубины внедрения шариков в заготовку методом конечноэлементного моделирования. Моделирование позволяет сократить объем экспериментальной работы и измерений, а также прогнозировать результаты будущих экспериментов.

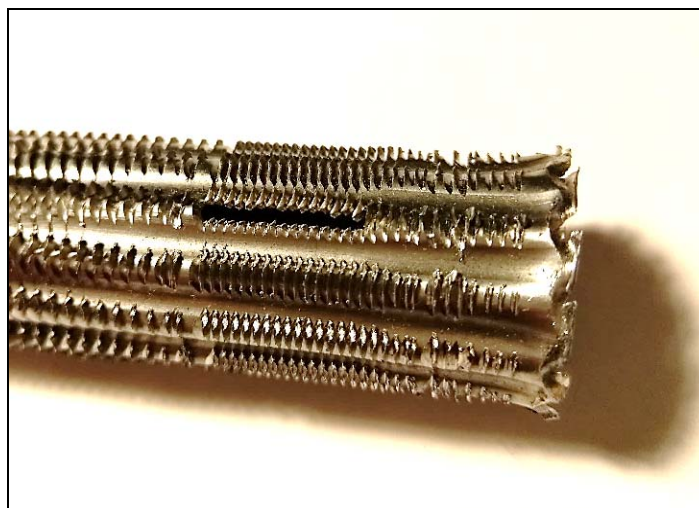


Рис. 5. Отрыв стенок щелей у основания гофров при превышении допустимой глубины резания

Моделирование процесса формовки продольных ребер на трубной заготовке проводилось с использованием программы LS-Dyna. Данная программа основана на методе конечных элементов и позволяет моделировать динамические задачи упругопластического деформирования металла, в том числе с учетом контактного взаимодействия между заготовкой и инструментом.

Исходные данные для моделирования были выбраны исходя из следующих соображений:

наружный диаметр $D = 35$ мм и толщина $t = 0,35$ мм исходных заготовок соответствуют реальному типоразмеру труб, с которыми ранее производились эксперименты по гофрированию и получению фильтрующих труб;

дополнительно рассматриваются толщины $t = 0,5$ мм и $t = 0,6$ мм, также доступные на рынке; большие толщины не рассматриваются, так как для них затрудняется и формообразование гофров, и деформирующее резание в дальнейшем;

количество шариков – 12 и их диаметр 8,731 мм соответствуют конструкции фильеры;

минимальное заглубление шариков равно толщине стенки заготовки, чтобы обеспечивалось последующее сквозное прорезание вершин гофров при сохранении конструктивной прочности трубы;

максимальное внедрение a шариков ограничивается конструкцией фильеры $a_{max} = 1,8$ мм;

внедрение увеличивается равномерно от минимального значения до максимального (всего 6 значений для каждой толщины заготовки).

Для создания математической модели заготовки были использованы оболочечные трехмерные элементы, поскольку трубная заготовка имеет толщину значительно меньше, чем ее диаметр. Поэтому трехмерная объемная геометрическая модель заготовки заменена на трехмерную поверхностную, с заданной толщиной. Для математического описания закона деформирования заготовки использовалась билинейная модель упругопластического тела.

Расчетная сетка математической модели показана на Рис. 6. Деформирование заготовки осуществляется шариками, которые жестко установлены в обойме и не имеют возможности перемещаться. Поэтому в математическую модель были включены только сами шарики, без обоймы. Поскольку обойма была исключена, то для закрепления шариков им была ограничена возможность перемещения и вращения вокруг всех трех осей.

В натуральном эксперименте по формовке ребер заготовка проталкивалась через фильеру, при этом сила прикладывалась к заднему концу заготовки (на рис. 6 он находится слева) и заготовка осуществляла движение вдоль оси z , обозначенной на рисунке. Что бы не создавать модель толкателя и не усложнять тем самым задачу, в математической модели заданные перемещения прикладывались непосредственно к узлам расчетной сетки заготовки.

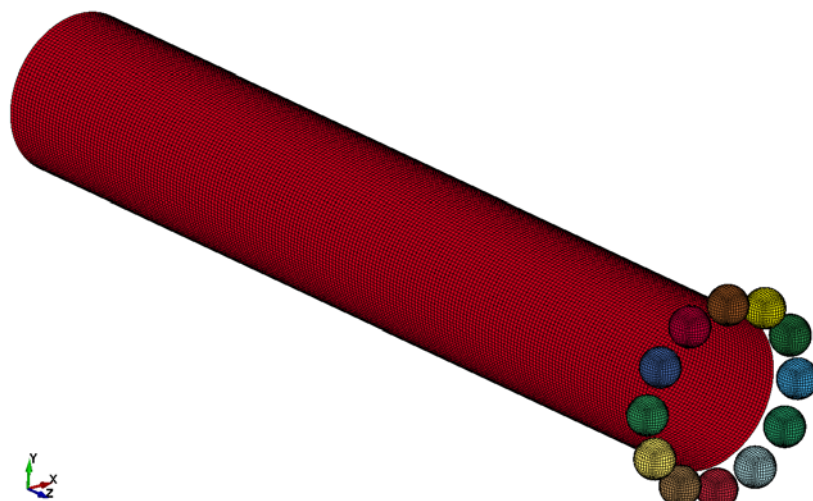


Рис. 6. Расчетная сетка

В результате расчета математической модели было получено деформированное состояние расчетной сетки заготовки, которое показано на Рис. 7 для одного из промежуточных состояний в процессе формовки.

Time = 0.41731

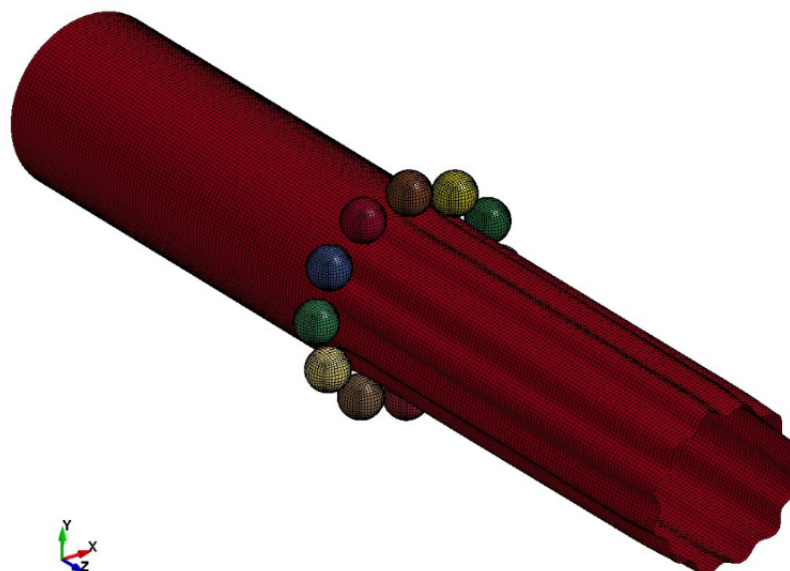


Рис. 7. Внешний вид деформированной расчетной сетки, полученный в процессе решения

Также по результатам моделирования были построены сечения получаемой гофрированной трубы, по которым проводились измерения. Измерение высоты гофров проводилось в САПР КОМПАС-3D по средней линии профиля между окружностью, вписанной во впадины профиля, и верхней точкой выступа каждого гофра. Пример измерения полученного сечения для толщины заготовки $t = 0,35$ мм и глубины внедрения $a = 0,93$ мм представлен на Рис. 8.

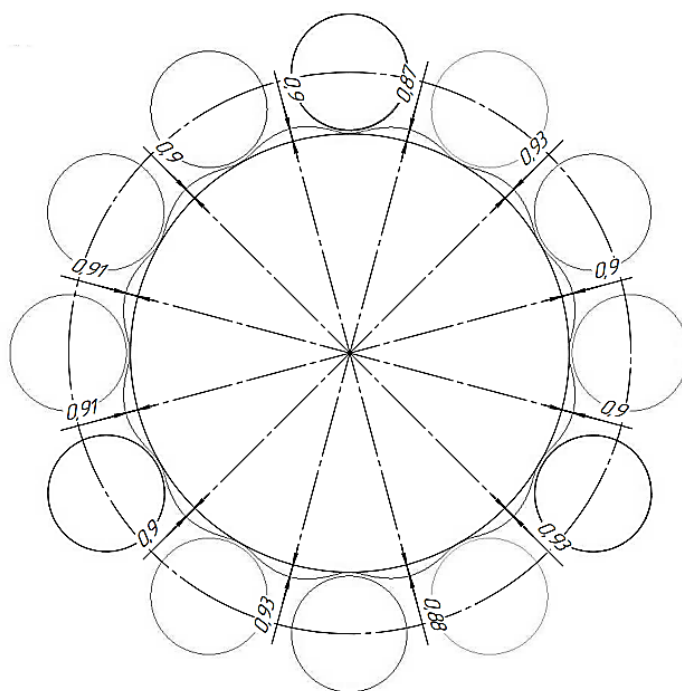


Рис. 8. Измерение высоты гофров

Для каждого сечения рассчитана разновысотность Δ и среднеквадратичное отклонение σ высоты гофров, характеризующее общую неравномерность высоты гофров сечения; построены графики зависимости σ и Δ от глубины внедрения a шариков (Рис. 10). Для примера на Рис. 8 разновысотность $\Delta = 0,06$ мм, среднеквадратичное отклонение высоты $\sigma = 0,02$ мм.

При глубине внедрения 1,51 мм и 1,8 мм в заготовку толщиной 0,35 мм моделирование показало отклонение результирующего профиля от заданной формы, с прогибом материала на предполагаемом месте образования некоторых гофров не наружу, а внутрь.

Аналогичная картина была получена ранее при гофрировании нетермообработанных труб с большой глубиной внедрения шариков (Рис. 9). Высота для таких гофров при расчетах разновысотности принималась со знаком «-».

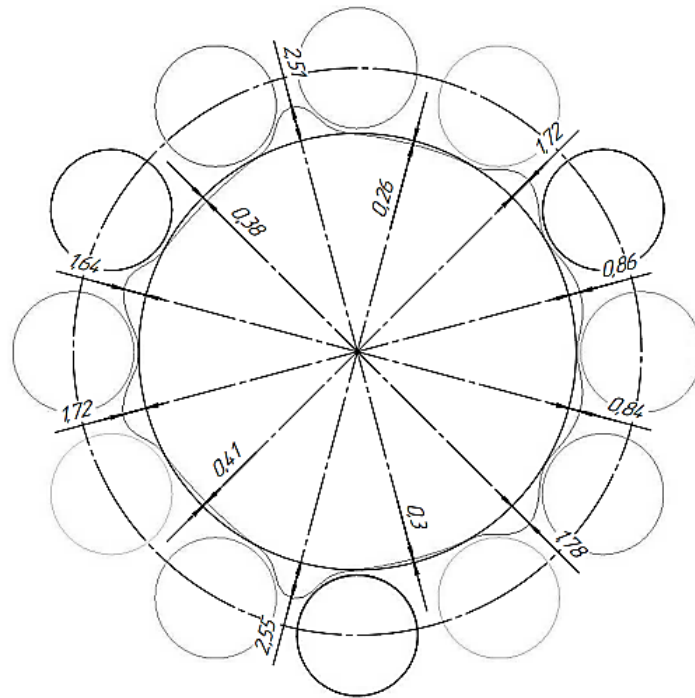


Рис. 9. Прогиб части гофров вовнутрь

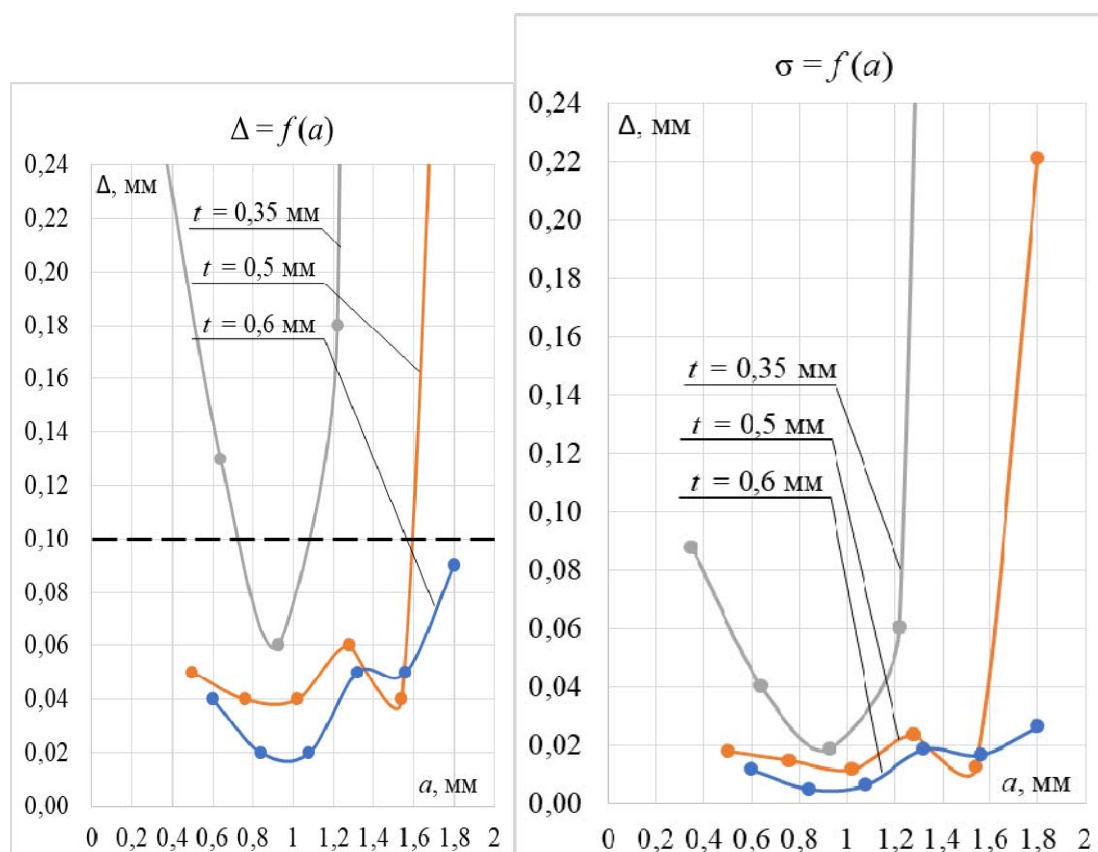


Рис. 10. Графики зависимости разновысотности Δ и среднеквадратичного отклонения σ высоты гофров от глубины внедрения a шариков

Для обобщения результатов, полученных для разных толщин, рассчитана также относительная глубина внедрения $a_{отн} = a / t$, и построены аналогичные графики.

Как следует из графиков, для всех трех толщин заготовок наблюдается 1 или 2 локальных минимума разновысотности в зоне малых относительных глубин внедрения $a_{отн} \leq 2,5 \dots 3$. При дальнейшем внедрении шариков разновысотность резко возрастает, превышая допустимые значения. Для толщины заготовки 0,35 мм отмечены также высокие значения разновысотности при низких значениях глубины внедрения шариков ($a_{отн} < 2$).

Интервалы глубин внедрения, обеспечивающих разнорысность $\Delta \leq 0,1$ мм:

- для толщины стенки 0,35 мм: $0,75 \text{ мм} \leq a \leq 1,1 \text{ мм}$;
- для толщины стенки 0,5 мм: $a \leq 1,6 \text{ мм}$;
- для толщины стенки 0,6 мм: обеспечивается на всем интервале хода шариков фильеры (1,8 мм).

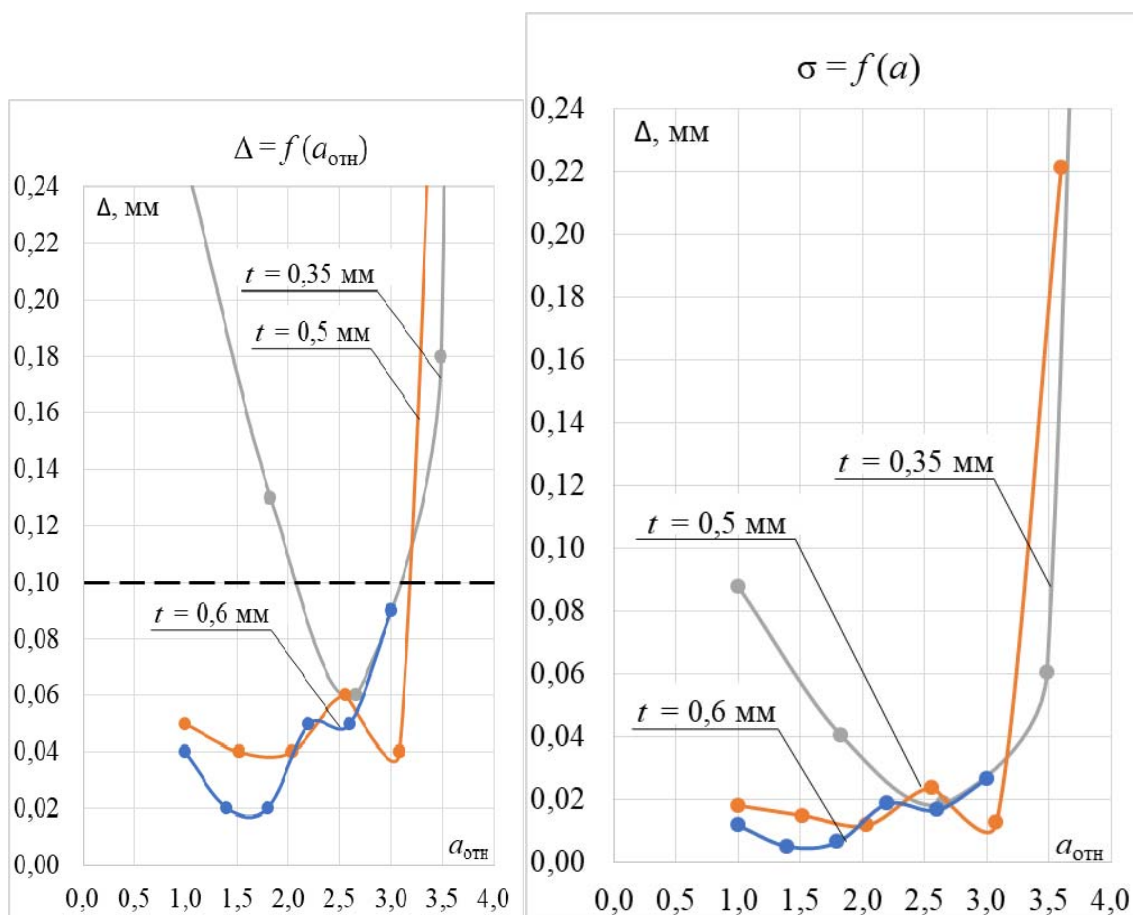


Рис. 11. Графики зависимости разнорысности Δ и среднеквадратичного отклонения σ высоты гофров от относительной глубины внедрения $a_{отн}$ шариков

В дальнейшем предполагается проведение аналогичных расчетов для случая многопроходного гофрирования (с пошаговым заглублением

шариков), а также измерение реальных гофрированных профиля для количественного сопоставления с результатами моделирования.

Выводы:

1. В результате проведённого исследования было показано, что деформация трубной заготовки в шариковой фильере происходит неустойчиво, в результате чего высоты получаемых гофр различаются, а в некоторых случаях деформация заготовки происходит совсем иным образом и получаемая форма рёбер не соответствует ожидаемой.

2. В результате анализа полученных графиков, которые показывают зависимость разновысотности гофров от глубины внедрения шариков, показано, что чем больше толщина стенки трубной заготовки, тем меньше разброс высот получаемых гофров.

3. В процессе формовки шарики действуют на трубную заготовку снаружи, поэтому в окружном направлении заготовка находится в сжатом состоянии, кроме того, продвижение заготовки через шариковую фильеру осуществляется за счёт толкающей силы, приложенной к заднему концу заготовки, поэтому в продольном направлении заготовка так же находится в сжатом состоянии. Учитывая это, а также выводы, сделанные в п.1 и п.2, можно утверждать, что разновысотность получаемых гофров возникает вследствие потери устойчивости цилиндрической оболочки под действием сжимающей нагрузки в окружном и осевом направлении.

Библиографический список

1. Зубков Н. Н., Васильев В. А. Фильтрующие элементы новой конструкции и оборудование для их производства // *Металлург*. 2016, №5, 77-82.

2. Pat. 3744290A USA, Int. Cl. B23K20/001. Method of producing duplex internally finned tube unit / John M Keyes, 1964.

3. Паршин С. В. Процессы и машины для изготовления профильных труб. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 356 с.

4. Бузаев Д.А. Получение щелевых фильтроэлементов на основе металлических труб круглого сечения // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» : сборник докладов. 24–27 сентября 2018 г. / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018 — 842, [2] с. : ил.

Секция 3

«Подготовка производства»

УДК 621.981

О ПОТРЕБНОМ КОЛИЧЕСТВЕ КЛЕТЕЙ ДЛЯ ФОРМОВКИ ПРОФИЛЕЙ КОРОБЧАТОГО ТИПА

Гульшин В.А.¹, Филимонов А.В.², Филимонов В.И.³

1 – нач. Центра подготовки специалистов АО «Ульяновский механический завод», к.т.н., доц.;

2 – технический директор АО «Новые промышленные технологии» (г. Н. Новгород), к.т.н.,

3 – ВНС АО «Ульяновский НИАТ», д.т.н., профессор

Аннотация: На основе модельного расчёта необходимого числа клетей для формовки 31 коробчатого профиля и сравнения результатов с практическими значениями установлено, что модель пригодна для расчётов числа переходов типовых профилей с ошибкой менее 5%.

Ключевые слова: профилирование, метод интенсивного деформирования, коробчатый профиль, число переходов, профилировочный станок, межклетьеовое расстояние.

ON A REQUIRED NUMBER OF PASSES TO FORM THE BOX-TYPE PROFILES

Gulshin V.A.¹, Filimonov A.V.², Filimonov V.I.³

1 – head of Trainig center of the «Ulyanovsk Mechanical Plant», JSC, k.t.s., asc. prof.;

2 – technical director of the «New Industrial Technologies», JSC (city of N. Novgorod), k.t.s.,

3 – LR of the «Ulyanovsky NIAT», JSC, d.t.s., professor

Abstract: Based on model calculation of needed number of passes to form 31 box-type profiles being compared with practical data, we've established that the developed model is fit to calculate number of passes for typical profiles with an error inferior to 5%.

Key words: roll-forming, intensive deformation method, box-type profile, number of passes, roll-forming machine, inter-stand distance.

Гнутые профили коробчатого типа в номенклатуре освоенных гнутых профилей в мире составляют по некоторым оценкам от 57 % до 65%. В работе [1] представлено современное состояние технологии на основе метода интенсивного деформирования (МИД) в профилировании. Там же, вся номенклатура гнутых профилей разделена (с технологической точки зрения) на профили уголкового, коробчатого, зетового и специального типа. В номенклатуре профилей коробчатого типа, в свою очередь, можно выделить профили швеллерного, корытного и С-образного типа. При этом, в технологии профилирования существуют три несколько отличающихся между собой метода: традиционное профилирование (ТП) [2], стеснённый

изгиб (СИ) [3] и МИД [1]. В каждом из указанных методов, имеющих свои сферы приложения (СИ, ввиду его узкого применения в авиастроении, здесь не рассматривается), определение потребного числа переходов (клетей) основывается на различных моделях. В этой публикации речь идёт о МИД, для которого вопрос о числе переходов при формовке швеллерных профилей (составляющих часть номенклатуры профилей коробчатого типа) исследован достаточно подробно [4]. Поэтому цель настоящей работы состоит в верификации и уточнении потребного числа переходов для корытных и С-образных профилей, изготавливаемых МИД, на контрасте с ТП.

МИД ориентирован преимущественно на профилирование ленты только в горизонтальных валках, без применения межклетевых проводок. Разработке технологии производства профиля на профилегибочном станке обычно предшествует оценка технологичности его изготовления и процедура выбора расположения сечения профиля в чистовой клетке станка. Последнее характерно для несимметричных профилей, поскольку в ряде случаев наклон донной части позволяет компенсировать возникающее при формовке скручивание. Симметричные профили располагают обычно открытой частью вверх при горизонтальном положении дна.

До недавнего времени определение числа переходов было основано на предыдущем опыте разработчика и заводской традиции, что приводило к ошибкам и необходимости доработки технологической оснастки или же к смене используемого станка (с недостаточным числом профилирующих клеток), что влекло избыточные финансовые издержки.

В МИД наиболее совершенной моделью является полуэмпирическая мультипликативная модель числа переходов (1), имеющая состоятельную интерпретацию [1].

$$N = \frac{H}{L_m \cdot \beta} \left(\sqrt{\frac{s}{k \cdot T}} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_b} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{B}{W} \cdot n \cdot \alpha}, \quad (1)$$

где H , B – высота и ширина сечения профиля соответственно, мм; W – ширина развертки заготовки, мм; L_m – межклетьеовое расстояние профилировочного станка, мм; β – предельный угол «стеснения» заготовки, °; s – толщина заготовки; k – квалитет сечения профиля; T – допуск размера сечения для квалитета k , мм; σ_s , σ_b – предел текучести и прочности материала заготовки соответственно, МПа; n – число зон изгиба профиля; α – усреднённый суммарный угол подгибки полок, °.

В модели (1) первый сомножитель отражает соотношение высоты профиля и ширины подгибаемой полки с «надстройкой». Вторым сомножителем даётся соотношение толщины стенок профиля и требуемой точности его сечения. Свойства материала заготовки учитываются вторым сомножителем в скобках. Боковое «стеснение» заготовки (в горизонтальной плоскости) и число зон изгиба учитывает сомножитель в виде кубического корня. Суммарный угол подгибки полок факторизуется здесь с описанным ранее выражением.

В традиционном профилировании наиболее распространёнными являются две модели: аддитивно-мультипликативная модель Т. Халмоса (США) [2] и модель компании «Хитачи Киндзоку» (Япония) [5]. Первая из этих моделей наиболее полно учитывает факторы (но, возможно, не их «весовые» вклады), влияющие на необходимое число переходов. Вторая распадается на две мультипликативные модели: одна для «широких», а другая – для «узких» профилей без указания критерия такого разделения. В обеих последних моделях используются похожие функции формы, представленные графически, однако входящие в каждую из них характеристики профиля – различны. В нашей более ранней публикации [4] графическое представление функций формы в модели «Хитачи-Киндзоку» переведено в аналитическую форму для осуществления автоматизированных

вычислений, например, с помощью программы MathCad2001Pro или ей подобных.

Модель Т. Халмоса [2] имеет следующий вид:

$$N = [0,237 \cdot H^{0,8} + 0,834 \cdot s^{-0,87} + \alpha / 90] \cdot \left[\frac{\sigma_s^{2,1}}{40 \cdot \sigma_B} \right]^{0,15} \cdot F \cdot (1 + 0,5z) + e + f + 5 \cdot z \cdot F, \quad (2)$$

где N – число переходов; H – высота профиля, мм; s – толщина заготовки, мм; α – суммарный угол подгибки, °; σ_s и σ_B – предел текучести и предел прочности материала заготовки, Мпа; F – фактор формы; z – коэффициент учёта наличия отверстий и надрезов; e – добавочное число переходов при поштучном профилировании; f – добавочное число переходов, связанное с точностью поперечного сечения профиля.

Модель Т. Халмоса (2) также является полуэмпирической, однако она не имеет наглядной геометрической или физической интерпретации, что, впрочем, не мешает ей достаточно хорошо работать при определении числа переходов профилей, формуемых традиционным профилированием. Можно указать некоторые издержки в данной модели:



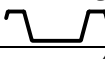
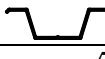
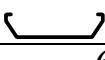
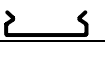



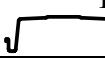

- отсутствие зависимости числа переходов от межклетьевого расстояния станка (учёт возможности предотвращения переформовки профиля);
- неоднозначность выбора полки несимметричного профиля для проведения расчёта;
- неопределённость выбора угла подгибки в многоэлементном профиле;
- отсутствие зависимости от числа зон изгиба профиля (хотя, возможно, это учитывается косвенно через фактор формы $F=1 \div 1,5$);



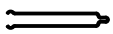

















– странный способ задания вклада, отражающего влияние перфорации и надрезов, – отсутствие зависимости коэффициента z от формы, размера и топологии отверстий и надрезов.

В модели числа переходов «Хитачи-Киндзоку» [5] отличие в результатах расчёта на границе «узкий профиль-широкий профиль» по той и другой модели может достигать 4...5 переходов и более при прочих равных значениях входящих параметров.

Указанные три модели реализованы в среде MathCad2001Pro для расчёта числа переходов корытных и С-образных профилей (табл. 1), производство которых уже освоено в г. Ульяновске. Следовательно, в случае использования МИД потребное (практическое) значение числа клеток для них известно.

Таблица 1. Число переходов по выборке из коробчатых профилей

Номер и эскиз сечения	Размер сечения, мм	Число переходов в трёх моделях			
		МИД	Практ.	Халмос	Хитачи
1. 	122×82×1	10,4	10	15,5	8,4 5,4
2. 	170×83,6×1,2	8,9	8	15,4	8,9 7,0
3. 	129×44×1	8,6	8	10,4	7,2 6,0
4. 	90×26×0,5(0,8)	5,7	6	8,9	5,0 –
5. 	128×35×0,8	11,5	12	9,4	5,6 4,0
6. 	52×16×0,7	6,9	8	8,0	– –
7. 	9×18×0,8	5,6	6	7,0	6,2 –
8. 	85×55×0,85	8,5	8	12,4	10,7 6,3
9. 	60×35×20×1,0	8,0	8	9,4	7,0 5,7
10. 	328×110×0,8	12,8	12	19,4	14,2 10,4
11. 	100×50×1,5	8,6	8	11,1	10,6 9,6

Номер и эскиз сечения	Размер сечения, мм	Число переходов в трёх моделях			
		МИД	Практ.	Халмос	Хитачи
12. 	99×48×1,2	8,4	8	11,1	3,1 –
13. 	57,9×98,8×1	9,2	8	17,8	15,8 6,9
14. 	74×10×1,0	9,8	8	14,7	28,2 6,5
15. 	41×41×2,5	9,2	9	9,5	7,5 7,6
16. 	35×20×1,2	7,8	8	6,8	5,0 3,7
17. 	60×40×1	8,4	8	10,1	9,7 6,4
18. 	145×45×15× 0,7	8,0	8	11,3	8,2 5,1
19. 	128×35×1,2	8,0	8	11,3	4,6 –
20. 	137×42×1,1	7,7	8	10,9	9,6 5,9
21. 	110×77×1,5	16,6	16	14,7	15,2 11,3
22. 	37×16×0,8	6,4	6	6,7	5,0 1,9
23. 	70×21×21×0, 5	8,2	8	8,3	4,7 –
24. 	165×50×2	12,6	12	10,9	10,3 12,9
25. 	258,7×13×12, 4×0,45	5,9	6	5,2	1,5 8,2
26. 	35×27×1,5	5,9	6	7,8	3,0 –
27. 	40,5×27,5×0,6	6,4	6	9,0	4,1 –
28. 	37,5×10×4,5× 1,5	7,2	8	4,9	– –
29. 	41,5×28,5×12 ×1,0	8,2	8	8,4	6,6 2,6
30. 	70×20×1,5	8,1	8	6,7	3,9 7,6
31. 	113×90,5×1,5	15,6	16	16,4	15,7 16

Пример расчёта числа переходов для С-образного профиля 60×40×1 мм представлен на рис. 1, где в качестве входных данных заданы предел текучести и прочности заготовки, её толщина и ширина, размеры сечения, количество зон изгиба, углы подгибки, требования по точности, технологический параметр и межклетьеовое расстояние профилировочного станка.

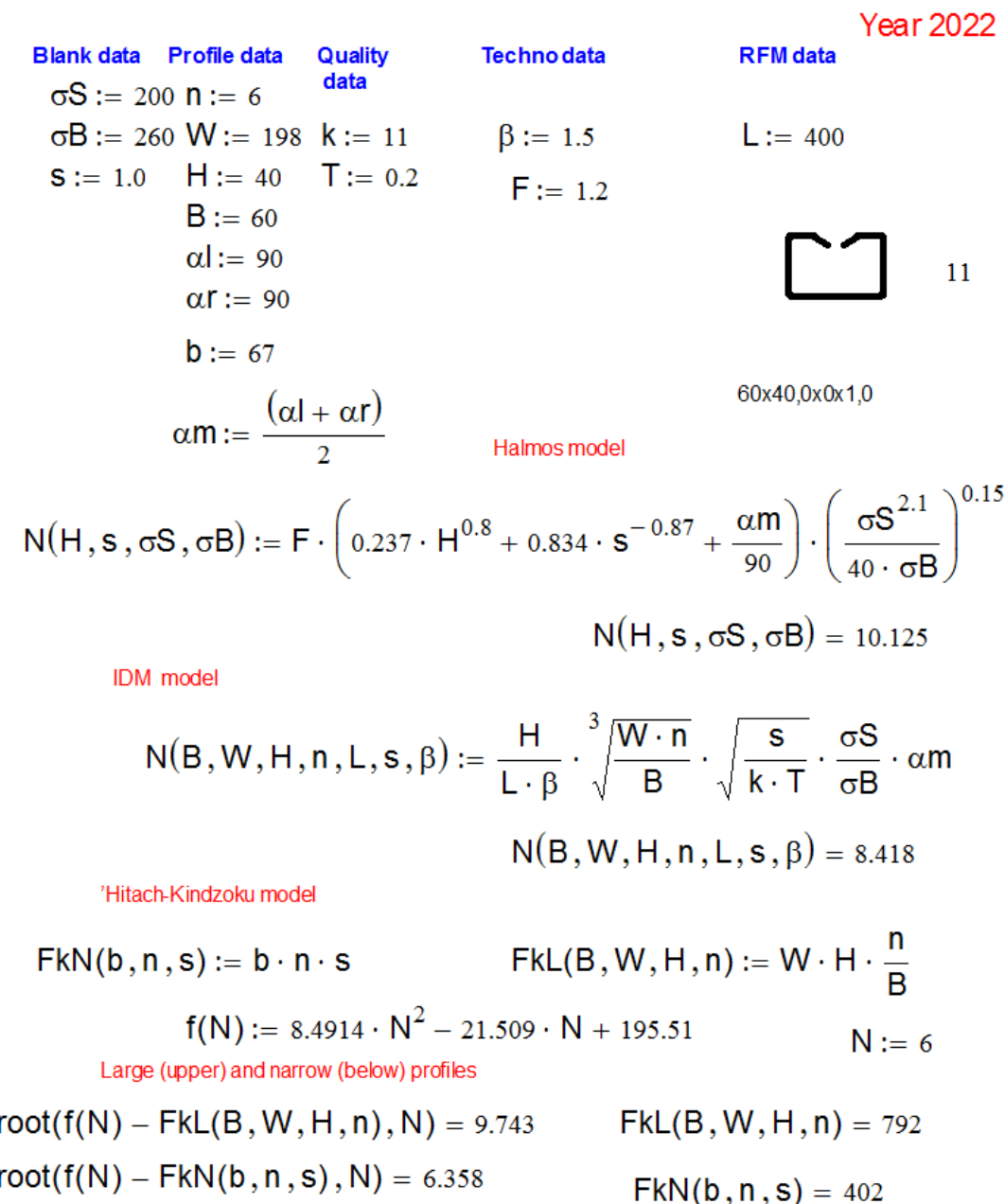


Рис. 1. Программа расчёта числа переходов

При выполнении расчётов полагали, профили не имеют перфорации или просечных элементов, а формообразование сечения осуществляется непрерывным образом. Статистическая обработка табл. 1 показывает, что для модели МИД стандартное отклонение по всей совокупности профилей рассматриваемого типа не превышает 0,39, что соответствует возможной ошибке при определении числа переходов в 4,5 %. Для профилей, формуемых за 8 переходов (наиболее многочисленная выборка), стандартное отклонение не превышает 0,49, т.е. ошибка менее половины перехода. С технологической точки зрения указанная точность является удовлетворительной с учётом того, что расчётное число переходов округляется, обычно в сторону меньшего целого числа.

Модель Халмоса, по-видимому, весьма чувствительна к толщине заготовки и в отношении профилей с двойной толщиной (см. №№ 25, 28 и 30 в табл. 1). В большинстве случаев она даёт более высокие значения числа переходов, чем модель МИД, как и следовало ожидать.

Модель Хитачи-Киндзоку для мелкосортных профилей даёт неправдоподобные результаты или же представляет их в виде комплексного числа (см. №№ 6, 7, 12, 19, 22, 23, 26, 27 и 28 в табл. 1). Зато эта модель работает почти идеально в отношении крупногабаритных профилей с шириной заготовки более 300 мм (см. №№ 10, 18, 20, 21, 31).

Однако и модель МИД в некоторых расчётах даёт не вполне удовлетворительные результаты. Речь идёт о мелкосортных профилях, для которых следует брать межклетьевое расстояние малогабаритного или специализированного станка, а не универсального станка с межклетьевым расстоянием в 400 мм. Возможно, следует брать в качестве межклетьевого расстояния некий виртуальный параметр, привязанный к некоторому оценочному значению протяжённости зоны плавного перехода для данного профиля. Кроме того, технологический параметр β (ноу-хау технологии), кажется, имеет корреляцию с шириной подгибаемой полки или параметром,

отражающим в некоторой степени смещение торца заготовки при формовке. Однако исследование этих вопросов составляет отдельный предмет и тему последующей публикации.

Таким образом, расчёт потребного количества клеток при изготовлении коробчатых (корытных и С-образных) профилей стандартной номенклатуры высотой от 40 до 90 мм и шириной от 50 до 120 мм можно вести с использованием модели МИД при вероятности ошибки менее 5%.

При расчёте числа переходов для мелкосортных профилей следует проявлять осторожность в отношении выбора подходящего оборудования и технологического параметра β .

Библиографический список

1. Гречников Ф.В., Филимонов С.В., Филимонов А.В. Метод интенсивного деформирования в производстве гнутых профилей. – Самара: Изд-во Самарского ФИЦ РАН. 2020. – 320 с.
2. Roll Forming Handbook / Ed. by G.T. Halmos. Boca Raton: CRC Press. 2006. 583 p.
3. Марковцев В.А., Марковцева В.В., Филимонов В.И. Производство гнутых профилей для авиационных конструкций. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 438 с.
4. Гульшин В.А., Филимонов А.В., Филимонов В.И. Об уточнённой модели числа переходов для формообразования швеллеров // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России. Материалы VI Международной НПК, 6 – 7 февраля 2021 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2021. (210 с.). С. 138 – 145.
5. Ona H., Jimma T. and Konzono H. A computer aided design system for cold roll forming // Advanced Technology of Plasticity-JSTP, 1984. P. 422-427.

УДК 621.981

КОЛИЧЕСТВО ВАЛКОВ, ТРУДОЁМКОСТЬ ИХ ОБРАБОТКИ И СЕБЕСТОИМОСТЬ КОМПЛЕКТА ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Гульшин В.А.¹, Филимонов С.В.², Филимонов В.И.³

1 – нач. Центра подготовки специалистов АО «Ульяновский механический завод», к.т.н., доц.;

2 – начальник отдела АО «Аэрокомпозин» (г. Ульяновск), д.т.н.;

3 – ВНС АО «Ульяновский НИАТ», д.т.н., профессор

Аннотация: Разработана программа автоматизированного расчёта числа формирующих валков, их размеров, массы, трудоёмкости их изготовления и стоимости, а также показана работа программы в приложении к конкретному профилю. Программа может быть полезна разработчикам для априорной оценки показателей будущего проекта.

Ключевые слова: профилирование, метод интенсивного деформирования, формирующий валок, размер заготовки, трудоёмкость обработки, себестоимость.

NUMBER OF ROLLS, WORK CONTENT AND PRODUCTION COST OF A ROLL SET FOR ROLL-FORMING

Gulshin V.A.¹, Filimonov S.V.², Filimonov V.I.³

1 – head of Training center of the «Ulyanovsk Mechanical Plant», JSC, k.t.s., asc. prof.;

2 – head of department of «Aerocomposite», JSC (city of Ulianovsk), d.t.s.,

3 – SR of «Ulyanovsky NIAT», JSC, d.t.s., professor

Abstract: There is developed a program of automated calculation to assess the number of forming rolls, their dimensions and mass, their work content (labor hours) and production cost. The program functionality is illustrated as being applied to a specific profile. The program may be useful to the developers for future project feasibility assessment.

Key words: roll-forming, intensive deformation method, forming roll, blank dimensions, processing labor hours, production cost.

При создании технологии профилирования на базе метода интенсивного деформирования (МИД) [1] для производства конкретного типоразмера профиля по заказу клиента важным для разработчика является априорное обоснование себестоимости комплекта валковой оснастки. Возможность составления точной калькуляции на комплект валков появляется только после ряда этапов проектирования: оценки технологичности, расчёта числа переходов, разработки схемы формообразования и чертежей валков. На стадии заключения договора, т.е. до начала проектирования, важно сделать наиболее точную оценку

стоимости будущего комплекта формующего инструмента для включения её в общую стоимость контракта.

Цель публикации – априорная оценка количества и размеров валковой оснастки, трудоёмкости её обработки/отработки и себестоимости.

Количество оснастки и её размеры определяется в зависимости от принятого метода формообразования и конфигурации сечения профиля. Влияние метода формообразования проявляется в числе переходов и способе замыкания валковых калибров. Если в традиционном профилировании иногда калибры могут быть открытыми, а валки позиционироваться дистанционными втулками, то в МИД используются только закрытые калибры, что предусматривает использование части металла валков на выполнение замыкающих элементов, которые типизированы и постоянны от перехода к переходу. Для асимметричных и уголкового профиля условиями технологии (выбор базового элемента и оси профилирования) может потребоваться поворот сечения к последнему переходу, тогда расчёты числа переходов и ширины валков ведут по габаритам окаймляющего прямоугольника [1]. Первоначально определяют ширину развертки заготовки и число переходов, а дальнейшие вычисления относят к длине заготовки роликов для каждого из переходов на основе квазилинейной зависимости ширины ролика от номера перехода. Расчётные формулы для определения размеров валков сведены в табл. 1. Так как нижний ролик обычно является охватывающим, то его ширина может быть больше ширины верхнего ролика на удвоенную величину ширины замыкающих буртов. В случае использования уступов, это различие пропадает.

Таблица 1. Формулы расчёта размеров валковой оснастки

Наименование величины и расчётная зависимость	Обозначение входящих параметров
W 1. Расчёт ширины заготовки	l_i – длина i -го прямолинейного участка сечения профиля; c_k – длина k -го криволинейного участка сечения профиля


$W = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{k=1}^{n-1} c_k, \quad (1)$	
<p>Число переходов:</p> $N = \frac{(W - D)}{2 \cdot L_m \cdot \beta} \left(\sqrt{\frac{s}{k \cdot T} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_B}} \right)^3 \sqrt{\frac{H}{B} \cdot n \cdot \alpha} \quad (2)$ <p>s – толщина заготовки; k – квалитет сечения профиля; T – допуск размера сечения для квалитета k, мм; σ_s, σ_B – предел текучести и прочности материала заготовки соответственно, МПа;</p>	<p>H, B – высота и ширина сечения профиля соответственно, мм; W – ширина развертки заготовки, мм; D – ширина дна профиля; n – число зон изгиба профиля; L_m – межклетьеовое расстояние профилировочного станка (длина зоны плавного перехода), мм; β – предельный угол «стеснения» заготовки, °; α – усреднённый суммарный угол подгибки полок, °</p>
<p>Ширина нижнего k-ого валка:</p> $W_k^l = B_s - \frac{B_s - B_R}{N} \cdot k + 2l_r + 2l_g + \xi_{wp} + t \quad (3)$	<p>B_s, B_R – ширина заготовки и ширина окаймляющего прямоугольника после поворота сечения профиля, мм; N – число переходов; k – номер перехода; l_r, l_g – ширина участка радиальной посадки (нижнего и верхнего) валков и ширина бурта соответственно, мм; ξ_{wp} – припуск на торцовую обработку валка, мм; t – припуск на разделительные операции, мм</p>
<p>Ширина верхнего k-ого валка:</p> $W_k^u = B_s - \frac{B_s - B_R}{N} \cdot k + 2l_r + \xi_{wp} + t \quad (4)$	
<p>Диаметр нижнего валка на k-ом переходе:</p> $D_k^l = d + 2G + \frac{H_R}{N} \cdot k + 2g \cdot \sin(2\alpha \cdot k / N) + 2h + 2\xi_d \quad (5)$	<p>d – диаметр рабочего вала клетки, мм; G – минимальный радиальный размер толщины стенки валка под калибром, мм; g – размер элемента жёсткости, мм; H_R – высота окаймляющего прямоугольника после поворота сечения профиля, мм; h – высота бурта замыкания калибра, мм; ξ_d – припуск на радиальную токарную обработку, мм</p>
<p>Диаметр верхнего валка на k-ом переходе:</p> $D_k^u = d + 2G + \frac{H_R}{N} \cdot k + 2h + 2\xi_d \quad (6)$	

Расчётные значения диаметров валков следует округлять с превышением до ближайших значений диаметров выпускаемого сортамента круглого проката. В МИД обычно используют заготовки диаметром от 130 до 200 мм. В ряде случаев отличие в диаметрах заготовки нижнего и верхнего валков незначительно. На рис. 1 приведена программа в пакете

MathCad2001Pro [3] для расчёта количества валков, трудоёмкости их обработки и их себестоимости.

Labor hours and cost of roll tooling manufacture / MathCAD pack

Blank data	Profile data	Quality data	Techno data		
$\sigma S := 200$	$n := 8$	$k := 11$	$\beta := 1.5$	$m := \frac{7.8}{1000}$	$Ch := 0.009$
$\sigma B := 260$	$W := 37.2$	$T := 0.02$	$Df := 10.0$	$t := 0.2$	$Cz := 0.3$
$s := 0.12$	$B := 17.0$	RFM data	$d := 5$	$g := 0.1$	$Ct := 0.42$
$Cm := 80$	$D := 7.8$	$L := 40.0$	$lw := 0.6$	$f := 0.8$	$CN := 2.5$
In Punit per kg	$\alpha d := 90$	$\alpha m := \frac{(\alpha d + \alpha r)}{2}$	$lb := 2$	$tsp := 165$	$IG := 0.42$
	$\alpha r := 90$		$lr := 0.8$		$Ttr := 1$
					$\frac{\text{Punit}}{\text{kg(pure)}}$

Number of steps(2) **Program body** $170 \times 83,6 \times 1,2$  $K := 1$ Profile complexity 1; 5 and 20

$$N(B, W, H, n, L, s, \beta) := \frac{B}{2L \cdot \beta} \cdot \sqrt[3]{\frac{H \cdot n}{W}} \cdot \sqrt{\frac{s}{k \cdot T}} \cdot \frac{\sigma S}{\sigma B} \cdot \alpha m$$

$$N(B, W, H, n, L, s, \beta) = 8.808$$

$N := \text{trunc}(N(B, W, H, n, L, s, \beta))$ $k := 1..N$ Correct N, if it is technologically needed by writing N(...):=

Roll dia $h_k := H \cdot \frac{k}{N}$ Roll width $b_k := W - \frac{(W - B)}{N} \cdot k$ $B_k := b_k + 2 \cdot lr + 2 \cdot lb + lw + t$

Roll raw volume $V0_k := \frac{\pi}{4} \cdot (D0_k)^2 \cdot B_k$

Out rem volume $Vf_k := \frac{\pi}{2} \cdot (Df + h_k) \cdot \frac{(D + b_k)}{2} \cdot h_k$ Drill rem volume $Vot_k := \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot B_k$

$Bmas_k := \text{round}(m \cdot V0_k)$ $Rdia_k := \text{round}(10 \cdot D0_k, -1)$ $Rwid_k := \text{round}(10 \cdot B_k, -1)$

Turn processing cost per rolol $Tt_k := \text{round}\left(\frac{Bmas_k \cdot tsp}{2 \cdot \sum_k Bmas_k}\right)$ $Rmas_k := \text{round}[m \cdot (V0_k - Vf_k - Vot_k), 0]$

Drill cost per roll $Td_k := \text{round}\left[\left(\frac{0.6}{\sum_k Rwid_k} \cdot N \cdot Rwid_k\right), 1\right]$ $Ts_k := \text{round}\left[\frac{0.75 \cdot (Rdia_k)^2}{(\max(Rdia))^2}, 1\right]$

Cost of tooling materials $CTm := \text{round}\left[\left(2 \cdot \frac{Cm}{1000} \cdot \sum_k Bmas_k\right), 1\right]$ $Tp_k := \text{round}\left[\frac{0.6}{\max(B)} \cdot (2 \cdot h_k + B_k), 2\right]$

Roll set cost without materials $TG := \left[2 \cdot \left(\sum_k (Ts_k + Td_k + Tp_k + Tt_k + Ttr \cdot K)\right) \cdot Cz \cdot (1 + IG) \cdot (1 + CN)\right] + \left(\sum_k Rmas_k\right) \cdot 2 \cdot Ch$

Work hours per roll without heat treatment $CLs_k := (Ts_k + Td_k + Tp_k + Tt_k + Ttr \cdot K)$ Total manuf. labor hours without heat treatment $TRSG := \text{round}\left[2 \cdot \left(\sum_k CLs_k\right), 1\right]$

Net roll set cost (TOTAL) $CTG := \text{round}[(CTm + TG), 1]$

Рис. 1. Программа расчёта параметров комплекта валковой оснастки

Ниже дано описание этой программы. Входные данные включают сведения о сечении профиля, подлежащего изготовлению, в частности,

свойства металла заготовки, её толщину и ширину, габариты профиля, ширину дна, число зон изгиба, углы подгибки, точность изготовления, категорию сложности профиля. К технологическим данным относятся задаваемое межклетье расстояние профилировочного станка, диаметр его рабочих валов, катающий диаметр валков, предельный угол «стеснения» заготовки, размеры обязательных элементов замыкания калибров, допуски на обработку. Здесь же указываются нормативы (в трудовых часах) на разделительные операции, токарную обработку, сверление, шлифовку и полирование, термическую обработку, отработку технологии. В блок экономических показателей входят: цена на материал заготовок валков из стали 9ХС (без дифференциации по сортаменту), усредненный норматив трудозатрат на изготовление, коэффициент налоговых выплат, коэффициент накладных расходов.

Все вычисления выполняются в «теле программы» с использованием базовых формул из табл. 1. Первоначально вычисляется число переходов, которое «усекается» до целого числа (обычно чётного). При необходимости изменения числа переходов (обычно в сторону увеличения) по технологическим соображениям, например, из-за ослабляющей перфорации, имеется подсказка о присвоении числу переходов нового значения. Далее определяется габаритная конфигурация заготовки по переходам (высота и ширина), а затем – диаметр и ширина каждой заготовки по переходам. Здесь же вычисляют массу заготовки валка для каждого перехода.

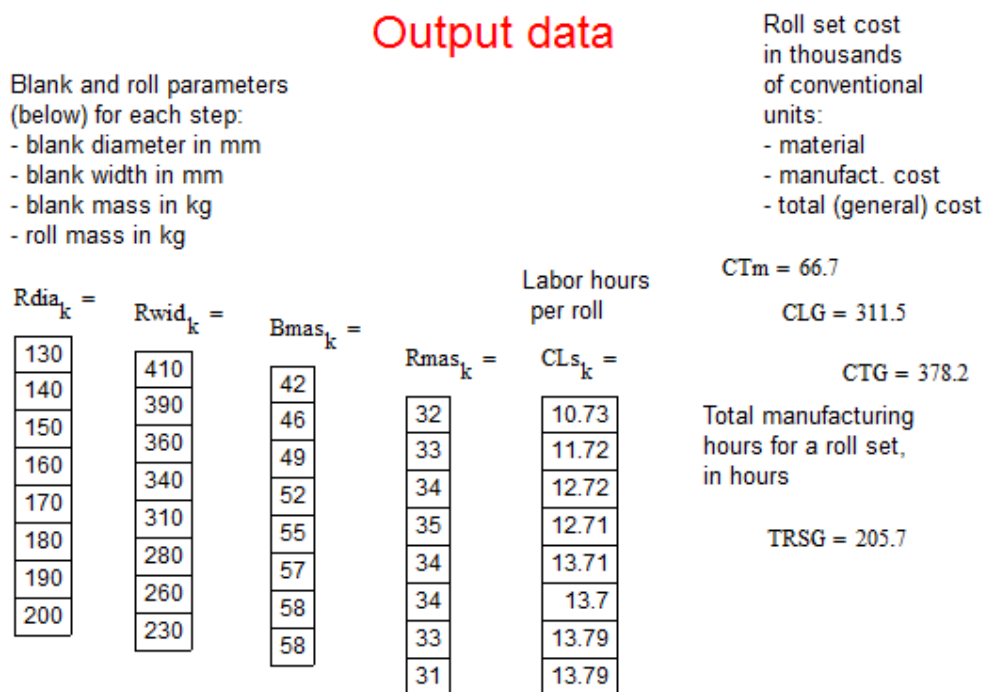
Последующие расчёты относятся к исчислению количества снятого материала при токарной и сверлильной операциях, а затем – к стоимости обработки (разделительной, токарной, сверлильной, шлифования и полирования) в расчёте на один валок. Стоимость отработки технологии в расчёте на один валок получают простой факторизацией удельной трудоёмкости отработки и коэффициента сложности профиля. Стоимость

материалов находят простым умножением цены на общую массу заготовок валков.

Себестоимость комплекта формующих валков без учёта материала получают суммированием всех трудоёмкостей (кроме трудоёмкости термообработки, которая учитывается аддитивным образом) с их факторизацией с множителями, отражающими нормативы оплаты труда, налогов и накладных расходов. Здесь же определяют общую трудоёмкость механической обработки и отработки технологии в расчёте на один валок и общую трудоёмкость на весь комплект валков. В конце программы определяется себестоимость комплекта валков с учётом стоимости материала круглого проката под заготовки.

На рис. 2 представлены результаты решения задачи (выходные данные), которые охватывают параметры заготовок и роликов (диаметр и ширину заготовок, массу заготовок и валков), а также трудоёмкость в расчёте на один валок. Здесь также даны такие показатели как стоимость материала валков, себестоимость их изготовления, общая себестоимость с учётом материала и полная трудоёмкость изготовления валков. Стоимостные показатели приведены в тысячах условных единиц (ср. с теми же показателями на конец 2017 года). Ниже даны частные виды трудоёмкости обработки заготовок валков по переходам для разделительных операций, токарной обработки, сверления, шлифовки и полирования с замечанием относительно трудоёмкости отработки технологии производства профиля, которая может отличаться на порядок в зависимости от сложности профиля. Кроме того, в приведенном расчёте нами не учтено то обстоятельство, что валки могут быть сборными. Сборные валки применяют в следующих случаях: 1) затруднённый доступ режущего инструмента для обработки некоторых рабочих поверхностей валков; 2) необходимость использования единого комплекта для изготовления однотипных профилей с различной шириной донной части; 3) большая ширина формующих валков (свыше 300 –

350 мм) [2]. Мы преднамеренно опустили некоторые виды расчётов ради наглядности представления программы и результатов, в частности, игнорировали предписание по сборности.



More detailed output for labor hours

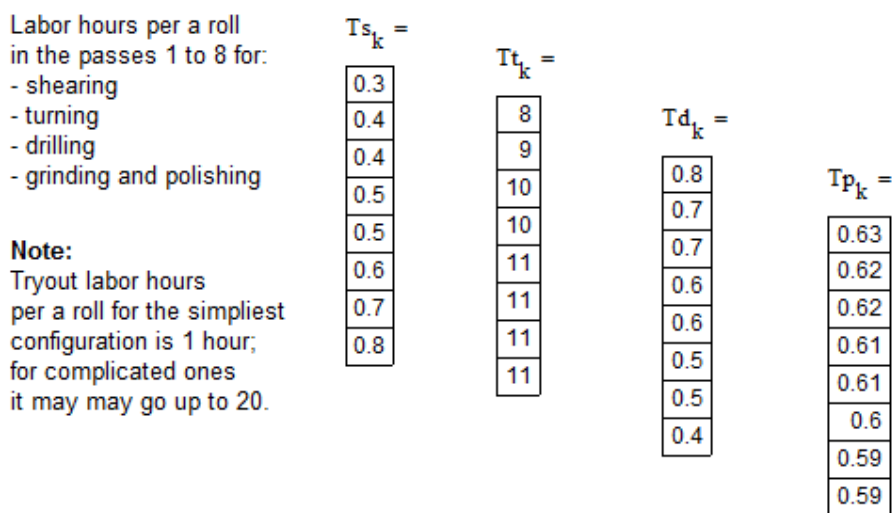


Рис. 2. Выходные данные программы расчёта валковой оснастки

В качестве иллюстрации к примеру расчёта на рис. 3 представлена схема формообразования профиля (а) и компоновка выборочных калибров валков (б).

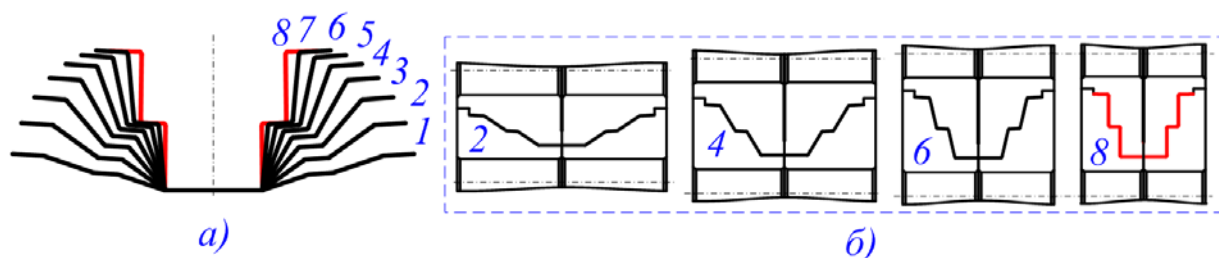


Рис. 3. Схема формообразования (а) и валковые калибры (б)

Здесь видно, что валки выполнены сборными, что связано с их достаточно большой шириной. Разработанная программа имеет более широкое приложение для анализа при создании технологий. Например, весьма легко получить коэффициенты использования материала как по индивидуальным валкам, так и по комплекту формирующих валков в целом и т.д.

Таким образом, разработанная программа может оказаться полезной разработчикам технологий профилирования для оценки прагматической составляющей проекта на предпроектной стадии и в процессе выполнения проекта.

Библиографический список

1. Филимонов С.В., Филимонов В.И. Интенсивное формообразование гнутых профилей. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 444 с.
2. Гречников Ф.В., Филимонов С.В., Филимонов А.В. Метод интенсивного деформирования в производстве гнутых профилей. – Самара: Изд-во Самарского ФИЦ РАН. 2020. – 320 с.
3. Макаров Е.Г. Инженерные расчёты в MathCAD. СПб: Питер. 2003. 448 с.

УДК 621.981

АЛГОРИТМ РАСЧЁТНЫХ ПРОЦЕДУР ВЫБОРА ПРОФИЛИРОВОЧНОГО СТАНКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЗАДАННОГО СЕЧЕНИЯ

Гульшин В.А.¹, Филимонов А.В.², Филимонов В.И.³

1 – нач. Центра подготовки специалистов АО «Ульяновский механический завод», к.т.н., доц.;

2 – технический директор АО «Новые промышленные технологии» (г. Н. Новгород),

3 – к.т.н., ЗВНС АО «Ульяновский НИАТ», д.т.н., профессор

Аннотация: Приведен алгоритм и расчётная процедура для выбора профилировочного станка под формовку гнутых профилей, реализованная в среде автоматизированных расчётов. Подход иллюстрирован примерами двух профилей с указанием типа подходящего оборудования для их изготовления.

Ключевые слова: профилирование, метод интенсивного деформирования, гнутый профиль, числа переходов, мощность привода, размеры валов.

CALCULATING PROCEDURES ALGORITHM TO CHOOSE A ROLL-FORMING MACHINE TO MANUFACTURE A PROFILE OF DEFINITE CROSS-SECTION

Gulshin V.A.¹, Filimonov A.V.², Filimonov V.I.³

1 – head of Trainig center of the «Ulyanovsk Mechanical Plant», JSC, k.t.s., asc. prof.;

2 – technical director of the «New Industrial Technologies», JSC (city of N. Novgorod), k.t.s.,

3 – LR of the «Ulyanovsky NIAT», JSC, d.t.s., professor.

Abstract: There are given the algorithm and calculating procedure to choose a roll-forming machine to produce roll-formed sections. The procedure is realized in the automatic calculation media. The approach is illustrated by two example profiles and a reference to appropriate equipment.

Key words: roll-forming, intensive deformation method, roll-formed profile, number of passes, drive power, axle dimensions.

Изготовление многоэлементного гнутого профиля в валках предусматривает выбор подходящего профилировочного станка из парка наличного профилегибочного оборудования. Такой выбор осуществляют обычно по требуемой мощности станка и характеристикам формирующих клеток, которые должны соответствовать ряду параметров профиля, подлежащего изготовлению, с учётом некоторых спецификаторов технологии. Для вновь организуемого производства при этом может возникнуть задача проектирования и изготовления нового станка под данный профиль и сопутствующую номенклатуру других профилей. Однако в том и другом случае возникает необходимость в расчётах, позволяющих определить требуемую мощность станка и характеристики формирующих клеток.

Цель данной публикации – формализация процедур расчёта производных параметров от изготавливаемого профиля для выбора или проектирования соответствующего профилировочного станка.

В традиционном профилировании (ТП) выбор станка для профилирования заготовки выполнялся весьма просто [1, 2]: для этого нужно было знать необходимое число клетей, ширину и толщину заготовки, а также её свойства (обычно, только её предел прочности) с тем, чтобы сравнить их с первичными паспортными данными станка. Однако это не всегда является достаточным. Например, при производстве высоких профилей небольшой ширины межосевое расстояние станка может оказаться слишком малым для формовки профиля. Поэтому требуется проводить более глубокий анализ по определяющим параметрам процесса. Что касается исходных данных для технического задания на проектирование нового станка, то здесь выполнение расчётов является строго необходимым. При этом нужно учитывать специфику применяемого метода формообразования. Так, при использовании метода интенсивного формообразования (МИД) [3] формовку производят исключительно в горизонтальных валках, а при ТП часто применяют межклетьевые проводки, под которые требуется некоторый избыток межклетьевого расстояния. То же самое относится к диаметрам формующих валков, которые в МИД в 1,5...2 раза меньше, чем в ТП. Имеется ряд и других отличий в этих технологиях.

На рис. 1 представлен алгоритм выбора профилировочного станка при использовании МИД, где указана ссылка на базу данных и даны основные расчётные параметры, которые сведены далее в табл. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора профилировочного станка

Отметим, что для поставленной задачи часто не требуются уточнённые расчёты некоторых параметров, например, расчёт ширины заготовки (1) достаточно принять по средней линии сечения профиля с точностью до

миллиметров. В среде автоматизированного проектирования этот параметр можно получить непосредственно с чертежа профиля.

Таблица 1. Процедура расчёта параметров профилегибочного станка

Расчётная зависимость в алгоритме	Входящие величины
<p>1. Расчёт ширины заготовки B</p> $W = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{k=1}^{n-1} c_k, \quad (1)$	<p>где l_i – длина i-го прямолинейного участка сечения профиля; c_k – длина k-го криволинейного участка сечения профиля.</p>
<p>2. Расчёт числа клеток N</p> $N = \frac{H}{L_m \cdot \beta} \left(\sqrt{\frac{s}{k \cdot T}} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_B} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{W}{B} \cdot n \cdot \alpha} \quad (2)$ <p>s – толщина заготовки; k – квалитет сечения профиля; T – допуск размера сечения для квалитета k, мм; n – число зон изгиба профиля; H, B – высота и ширина профиля соответственно, мм;</p>	<p>σ_s, σ_B – предел текучести и прочности материала заготовки соответственно, МПа; L_m – априорное межклетьеовое расстояние профилировочного станка, мм; β – предельный угол «стеснения» заготовки, °; W – ширина развертки заготовки, мм; α – усреднённый суммарный угол подгибки полок, °. (Округлить с превышением)</p>
<p>3. Расчёт суммарного угла подгибки,</p> $\varphi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \varphi_i, \quad (3)$	<p>где φ_i – внутренний угол между элементами (в рад.), примыкающими к i-ой зоне изгиба</p>
<p>4. Расчёт мощности формовки</p> $N_{\Phi} \text{ (в Вт): } N_{\Phi} = \frac{\sigma_s \cdot s^2 \cdot v \cdot \varphi_{\Sigma}}{240}, \quad (4)$	<p>где σ_s – предел текучести, МПа; s – толщина заготовки, мм; v – скорость профилирования, м/мин.</p>
<p>5. Расчёт мощности холостого хода (в Вт): $N_{\text{хх}} = N \cdot \chi$ (5)</p>	<p>где χ – мощность (в Вт) на одну клеть станка; $\chi = 200/500$ Вт (шестерёнчатый/червячный привод) [2]</p>
<p>6. Расчёт функции умножения мощности (Учёт повторных нагружений, трения и пр. $f(s)$):</p> $f(s) = 0,1359 \cdot s^{-0,44}, \quad (6)$	<p>где s – толщина заготовки $\{f(s)\}$ – безразмерная, достоверность аппроксимации – $R = 0,9445$}; аппроксимация на основе работы [2].</p>
<p>7. Расчёт полной мощности привода:</p>	<p>Потери в передаче учтены интегрально функцией $f(s)$</p>

Расчётная зависимость в алгоритме	Входящие величины
$N_{\text{п}} = \frac{N_{\text{с}}}{f(s)} + N_{\text{хх}} \quad (\text{в Вт}) \quad (7)$	
<p>8. Расчёт длины рабочих валов (в мм)</p> $l_{\text{р}} = B + 2e + m + h_{\text{р}} \quad (8)$ <p>(из ряда предпочтительных размеров)</p>	<p>где B – ширина заготовки, мм; e – размер зоны замыкания валкового калибра; m – толщина замыкающей серьги, мм; $h_{\text{р}}$ – длина нарезной части на конце вала, мм</p>
<p>9. Расчёт диаметров рабочих валов d (в мм):</p> $d = \sqrt[3]{\frac{\sigma_s \cdot s^2 \cdot R_0 \cdot \varphi_{\Sigma}}{1,6 \cdot f(s) \cdot [\tau]_k}} \quad (9)$	<p>где $[\tau]_k$ – допустимое напряжение на кручение, МПа {в формулу включён средний радиус R_0, равный 0,1 м, для определения момента)</p>
<p>10. Расчёт межосевого расстояния клетки (в мм):</p> $\Delta_{\text{с}} = d + \gamma \cdot H + \xi \quad (10)$ <p>где d – диаметр рабочих валов, мм; $\xi = 20$ мм – учёт мин. толщины валка;</p>	<p>H – высота профиля, мм (для МИД множитель $\gamma = 1,5$ – учёт движения кромки заготовки)</p>
<p>11. Расчёт межклетьевого расстояния (упрощённая модель)</p> $L = \sqrt{\left(\frac{8 \cdot b_0^3 \cdot \theta_k}{3 \cdot s} \right)} \quad (11)$	<p>где b_0 – эквивалентная ширина подгибаемой полки; θ – угол подгибки в одном переходе; s – толщина заготовки. (Ближайший из предпочтительных размеров с превышением)</p>
<p>12. Уточнение числа переходов по формуле (2) с $L_m = L$ из формулы (11)</p>	<p>Справочное значение для выявления избыточности числа переходов</p>

Программа расчёта параметров для выбора профилировочного станка, подлежащего использованию при формовке профиля $170 \times 83,6 \times 1,2$ мм, реализована в среде MathCad2001Pro и показана на рис. 2. Аналогичные расчёты выполнены и для профиля $89 \times 75 \times 1,5$ мм. Ниже по тексту даны некоторые пояснения к вычислительной процедуре.

Расчёт числа переходов (2) требует задания априорного межклетьевого расстояния станка (для МИД оно составляет 400 мм) и технологического

ограничения на «стеснение» заготовки, параметров точности сечения профиля, а также свойств заготовки (предела текучести и предела прочности материала). До недавнего времени назначение числа переходов было основано на предыдущем опыте разработчика и традиции проектирования технологии на том или ином предприятии и не было формализовано. Это часто приводило к необходимости доработки технологического оснащения, а иногда – к смене типа профилировочного станка с сопутствующими финансовыми издержками.

Дальнейшие расчёты по формулам (3) – (7) относятся к определению требуемой мощности профилировочного станка. Нами принята наиболее простая модель работы [2], основанная на учёте числа зон изгиба, толщины заготовки и её механических свойств, а также скорости требуемой профилирования. В этой модели учтены потери на преодоление сил трения, повторные нагружения и другие факторы с помощью некоторой интегральной функции, которая нами аппроксимирована для выполнения расчётов. Здесь коэффициент потери мощности отнесёт к справочным технологическим данным.

Дальнейшие вычисления по формулам (8) – (11) позволяют определять характеристики, соответствующие параметрам профилирующей клетки. При расчёте длины рабочих валов учтена ширина зон замыкания валковых калибров, толщина серги и длина нарезной части вала, характерные для МИД.

При расчёте диаметра вала основывались на действии крутящего момента с заданием среднего значения плеча момента сил. Указанное значение и допускаемое напряжение при кручении вала (материал отличается от материала заготовки!) также отнесены нами к исходной базе данных.

RFM parameters calculation


Blank data	Profile data	Quality data	Techno data	RFM data
$\sigma S := 200$	$n := 8$		$\beta := 3.4$	$L := 400$
$\sigma B := 260$	$W := 372$ $H := 83.6$	$k := 11$ $T := 0.2$	$e := 20$ $m := 20$ $h := 20$ $\tau := 140$	$v := 20$ $\chi := 200$ $R := 100$
$s := 1.2$	$B := 170$			
$\phi := \frac{\pi}{2} \cdot n$	$\alpha l := 90$ $\alpha r := 90$	$f(s) := 0.136 \cdot s^{-0.44}$	$\gamma := 1.5$	 170x83,6x1,2
$\alpha_m := \frac{(\alpha l + \alpha r)}{2}$		Program body	$b := \frac{W - B}{2}$	
Number of steps(2)				
$N(B, W, H, n, L, s, \beta) := \frac{H}{L \cdot \beta} \cdot \sqrt[3]{\frac{W \cdot n}{B}} \cdot \sqrt{\frac{s}{k \cdot T}} \cdot \frac{\sigma S}{\sigma B} \cdot \alpha_m$			$N(B, W, H, n, L, s, \beta) = 8.161$	
Forming power(4-7)				
$P_f := \frac{\sigma S \cdot s^2 \cdot v \cdot \phi}{240}$	$P_i := \chi \cdot N(B, W, H, n, L, s, \beta)$		$P_{glob} := \frac{P_f}{f(s)} + P_i$	
Axle length (8) $l := W + 2 \cdot e + m + h$				
Inter-axle distance (10)		$d_a := d + \gamma \cdot H + \xi$	Axle diameter (9) $d := \sqrt[3]{\frac{\sigma S \cdot s^2 \cdot R \cdot \phi}{1.6 \cdot f(s) \cdot \tau}}$	
Inter-stand distance (11)				
		$\theta := \frac{\alpha_m}{N(B, W, H, n, L, s, \beta) \cdot 57.3}$	$b_e := \sqrt{\frac{b^2 \cdot 2}{(n - 2) \cdot s^2}}$	$L_p := \sqrt{\frac{8 \cdot b_e^3 \cdot \theta \cdot s^2}{3}}$
Output data				
Number of steps	$\text{round}(N(B, W, H, n, L, s, \beta)) = 8$			
Machine power, kW	$\frac{P_{glob}}{1000} = 4.035$			
Axle length, mm	$l = 452$			
Axle dia, mm	$d = 23.436$			
Interaxle distance	$d_a = 168.836$			
Interstand distance	$L_p = 291.212$			

Рис. 2. Программа расчёта параметров станка по заданному профилю
 Расчёт межосевого расстояния включает характерные для МИД параметры – учёт движения кромки заготовки и минимальную толщину заготовки, которые также отнесены в исходную базу данных.

Расчёт межклетьевого расстояния осуществляется по упрощённой модели, в которой ширина подгибаемой полки определяется как полуразность между шириной развертки заготовки и шириной профиля, а угол подгибки – как частное от суммарного угла подгибки несущей полки и числа переходов.

Наконец, уточнение числа переходов производится для оценки избыточности числа переходов и рассмотрения альтернатив в выборе станка.

В том случае, когда расчёты ведутся для проектирования нового станка под заданную номенклатуру, следует ориентироваться на самый крупный по габаритам профиль и выполнить расчёты числа переходов с наименьшей и наибольшей толщиной заготовки из заданной номенклатуры на предмет назначения числа клеток (обычно кратное четырем или двум).

В табл. 2 сведены данные расчётов по двум профилям в сопоставлении с характеристиками профилегибочного станка ГПС-500×8 разработки и производства АО «Ульяновский НИАТ» [4].

Таблица 2. Расчёт параметры по двум профилям и характеристики станка

Параметр	Расчётные значения по профилям		Станок к ГПС-500×8
	170×83,6×1 ,2 мм	89×75× 1,5 мм	
Число переходов	8,16	8,49	8
Мощность привода, кВт	4,0	6,3	11
Длина рабочих валов, мм	452	288,7	500
Диаметр валов, мм	23,4	49,1	65
Межосевое расстояние, мм	168,8	140	205
Межклетьевое расстояние, мм	291,2	302,7	396

Подходящий станок ГПС-500×8 для производства двух профилей из табл. 2 предназначен для непрерывной формовки заготовок шириной 500 мм

и толщиной от 0,5 до 2,5 мм, что объясняет завышенные параметры, относящиеся к мощности привода и диаметру валов.

Таким образом, расчётная процедура выбора подходящего станка для формовки конкретного профиля формализована и реализуется программными средствами.

Библиографический список

1. Roll Forming Handbook / Ed. by G.T. Halmos. Boca Raton: CRC Press. 2006. 583 p.

2. Давыдов В.И., Максаков М.П. Производство гнутых тонкостенных профилей. – М.: Металлургиздат, 1959. – 240 с.

3. Гречников Ф.В., Филимонов С.В., Филимонов А.В. Метод интенсивного деформирования в производстве гнутых профилей. – Самара: Изд-во Самарского ФИЦ РАН. 2020. – 320 с.

4. Марковцев В.А., Марковцева В.В., Филимонов В.И. Производство гнутых профилей для авиационных конструкций. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 438 с.

УДК 621.071

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИОННОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кокорин В.Н.¹, Морозов О.И.², Мишов Н.В.³

1 – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

2 – ст. преподаватель каф. «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

3 – Магистрант УлГТУ, г. Ульяновск

Аннотация. Рассмотрены основные способы повышения стойкости рабочих частей штампового инструмента, в том числе процессы холодного пластического деформирования при нанесении износостойких покрытий методом ионно-плазменного напыления. Представлена физическая модель процесса холодного пластического деформирования образцов из теплостойкой стали X12M

Ключевые слова: механическая активация, деформация, износостойкость, покрытие, адгезия

MODERN PROCESSES OF IONNOPLASMA SPRAYING DUE TO MECHANICAL ACTIVATION OF THE WORKING SURFACE

Kokorin V.N.¹, Morozov O.I.², Mishov N.V.³

1 - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Department of "Materials Science and OMD" UISTU, Ulyanovsk

2 - Art. lecturer at the department "Materials Science and OMD" UISTU, Ulyanovsk

3 - Master student of UISTU, Ulyanovsk

Abstract. The main methods of increasing the durability of the working parts of a stamping tool, including the processes of cold plastic deformation when applying wear-resistant coatings by ion-plasma spraying, are considered. A physical model of the process of cold plastic deformation of specimens made of heat-resistant steel X12M is presented.

Keywords: mechanical activation, deformation, wear resistance, coating, adhesion.

Проведены экспериментальные исследования по выявлению основных функциональных связей комплексной поверхностной модификации штампов и пресс-форм. Для этого на предварительно подвергнутые деформации образцы ($\varepsilon=17...59\%$) было нанесено износостойкое покрытие на основе нитрида титана. Режим нанесения износостойкого покрытия методом ионно-плазменного напыления включал в себя следующие параметры: материал покрытия - нитрид титана (TiN), толщина покрытия - 3...4 мкм, температура – (400-480) °С. Деформированные образцы с нанесенным износостойким покрытием представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 - Образцы с нанесенным покрытием TiN

Для оценки параметра адгезионной способности износостойкого покрытия на основе нитрида титана было использовано устройство для испытания заготовок с покрытием на отслоение [1,2].

Зоны надавливания индентора на образцах представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фото зоны следов индентора на образцах







Затем производилась фиксация нарушения сплошности защитного покрытия (ширина следа, отслоение на границах следа) при помощи методов электронной микроскопии (на микротвердомере с возможностью измерения расстояния с точностью до 0,1 мкм).

Коэффициент отслоения рассчитывался исходя из отношения площади отслоившегося покрытия по краям оставленного индентором следа к общей площади отпечатка индентора.

Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица 1

Результаты измерений показателей нарушения сплошности покрытия

№ образца	1	2	3	4	5	6
Образец						
Толщина образца	5,24	4,28	3,53	2,91	2,62	2,50
Степень деформации ϵ , %	0	17	28	38	47	59
Ширина следа В, мкм	259,8	238,7	228,8	242,4	247,2	268,9
Коэффициент отслоения K_0	0,15	0,09	0,09	0,05	0,1	0,17

На основании результатов, представленных в таблице 1, были построены графические зависимости показателей покрытия в зависимости от степени деформации подложки под износостойкое покрытие (рис. 3).

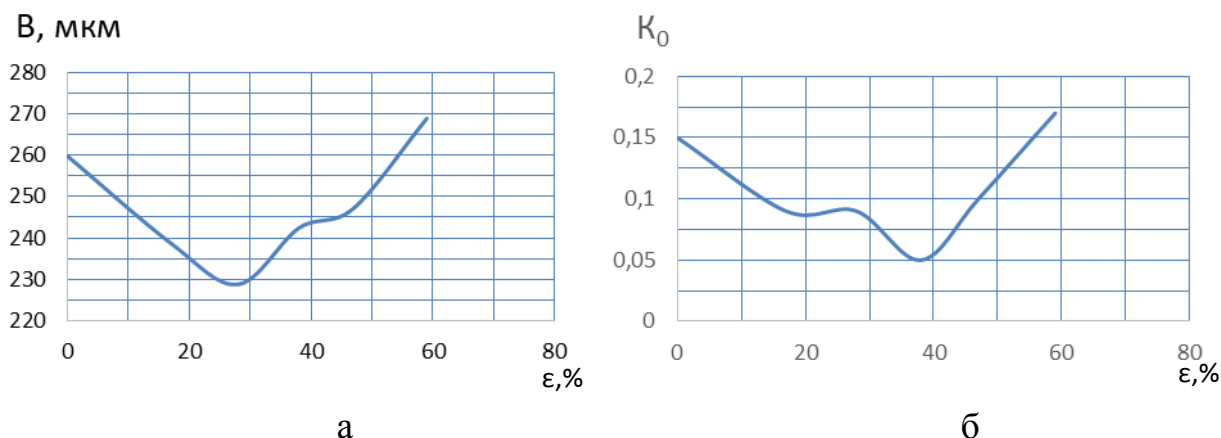


Рисунок 3 - Показатели качества покрытия в зависимости от степени деформации исследуемых образцов:

а - ширина следа В, мкм, б - коэффициент отслоения K_0

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы: при деформации подложки до значений относительной деформации 30% наблюдается снижение нарушения сплошности защитного покрытия под воздействием трения от приложенной постоянной нагрузки (уменьшение ширины следа В, мкм на 22%). Однако при повышении деформации

происходит рост нарушения сплошности (данный эффект можно объяснить разупрочнением материала подложки, который повышает способность верхних слоев материала деформироваться и подвергаться механическому воздействию); также при деформации подложки до значений относительной деформации 40% наблюдается снижение значения коэффициента отслоения, что может свидетельствовать о повышении адгезионной способности системы «подложка-покрытие» в интервале относительных деформаций от 10 до 30%.

Библиографический список

1. Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н., Титов Ю.А. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и прессформ из теплостойких сталей. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11: в 3 ч. Ч1. Тула: 2017. С. 64-68.

2. Морозов О.И., Кокорин В.Н., Табаков В.П., Сагитов Д.И., Илюшкин М.В. Ширманов Н.А. Повышение стойкости рабочих поверхностей штампов при использовании комплексной модификации. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, №3. 2019. С.317-326.

УДК 621.9

ЗАВИСИМОСТЬ УСЛОВНОГО ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ОТ СПОСОБА РАСКРОЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Матвеева К.Ф.¹, Горшков Ю.С.², Павлов В.Ф.³

1 – инженер, аспирант каф. «Сопротивление материалов», Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королёва, г. Самара, matveeva_kf@mail.ru

2 – доцент каф. «Обработка металлов давлением», к.т.н., Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королёва, г. Самара, usgorshkov@yandex.ru

3 – заведующий каф. «Сопротивление материалов», д.т.н., профессор, Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королёва, г. Самара, pavlov.vf@ssau.ru

Аннотация: приведены основные способы раскроя алюминиевых листовых заготовок. Выбраны типы образцов и режим испытаний на усталость. Определена величина условного предела выносливости для образцов, полученных методами фрезерования, лазерного раскроя и лазерного раскроя с последующим травлением. Установлено, что после лазерного раскроя условный предел выносливости снижается почти в два раза.

Ключевые слова: листовая заготовка из сплава Д16АТ, лазерный раскрой, условный предел выносливости, структура, травление.

INFLUENCE OF SHEET BILLET MADE OF D16AT ALLOY CUTTING METHOD ON A CONDITIONAL ENDURANCE LIMIT

Matveeva K.F.¹, Gorshkov Yu.S.², Pavlov V.F.³

1 – graduate student, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, matveeva_kf@mail.ru

2 – associate professor, Ph.D., Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, usgorshkov@yandex.ru

3 – head of the department, professor, doctor, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, pavlov.vf@ssau.ru

Annotation: the main methods of cutting aluminum sheet blanks are given. Specimen types and fatigue test mode are selected. The value of the conditional endurance limit for samples obtained by milling, laser cutting and laser cutting with subsequent etching is determined. It has been established that after laser cutting the conditional endurance limit is reduced by almost two times.

Keywords: parent sheet of D16AT alloy, laser cutting, conditional endurance limit, structure, etching.

В заготовительно-штамповочном производстве механическая обработка методом фрезерования и лазерный раскрой получили широкое распространение [1]. В то же время фрезерование имеет ряд недостатков: производительность процесса невысока, существуют трудности при закреплении крупногабаритных листов на станке, минимальный радиус

обработки ограничивается размером инструмента, при фрезеровании возникают отходы в виде стружки, а на заготовке образуются заусенцы [2 – 4].

На производстве в качестве заготовительно-разделительной операции всё шире применяется лазерный раскрой. Резка лазером чаще всего реализуется на твёрдотельных лазерах (ND: YAG) с кристаллом легированного неодимом (ND) алюмоиттриевого граната (YAG) [5]. Метод лазерного раскроя обеспечивает высокую производительность процесса в сочетании с высокой точностью и качеством поверхностей реза, а также обеспечивает малую ширину реза [6]. Одним из существенных недостатков лазерного раскроя является наличие зоны температурного влияния в зоне воздействия лазерного пучка, которая приводит к изменению свойств материала на кромке заготовки. В некоторых случаях в зоне действия растягивающих напряжений на кромках заготовок наблюдается образование трещин [7].

Методика испытаний

Образцы для испытаний на усталость нарезались из холоднокатанного листа толщиной 2,5 мм из сплава Д16АТ поперёк направления прокатки. Одна часть образцов изготавливалась фрезерованием, другая часть образцов – лазерным раскроем.

Испытания образцов на усталость производились на машине УММ-01 [08] на изгиб в случае симметричного цикла нагружения. Оценивался порог нагружения трёх образцов без их разрушения. Также образцы подвергались травлению в реактиве Келлера.

Результаты испытаний и их анализ

Вначале определялся условный предел выносливости на образцах, изготовленных фрезерованием (рис.1). Для этого поэтапно увеличивалась нагрузка до значения, при котором образец разрушался до 3 миллионов циклов. После превышения напряжения в 90 МПа, образец разрушается, не

выстояв 3 миллионов циклов. Следовательно, значение условного предела выносливости в данном случае составляет 90 МПа.



Рис. 1. Фрезерованные образцы после испытаний на усталость

Далее испытаниям на усталость подвергались образцы, полученные методом лазерного раскроя по аналогичной схеме нагружения (рис.2). После превышения напряжения в 55 МПа, образец разрушается, не выстояв 3 миллионов циклов. Таким образом, значение условного предела выносливости в данном случае составляет 55 МПа.



Рис. 2. Образцы, изготовленные лазерным раскроем, после испытаний на усталость

В результате испытаний на усталость установлено, что условный предел выносливости образцов, полученных методом лазерного раскроя, примерно на 60 % ниже, чем образцов, полученных методом фрезерования.

На торце образцов, изготовленных методом лазерного раскроя, имеется дефектный слой, связанный с пережогом металла, который является причиной снижения условного предела выносливости. Для удаления дефектного слоя металла с пережогом применялось травление, что позволило частично восстановить значение условного предела выносливости материала. В этом случае значение условного предела выносливости на 18% меньше, чем у фрезерованных образцов. Таким образом, проведённое исследование показывает, что эксплуатация изделий, полученных методом лазерного раскроя, может привести к усталостному разрушению в условиях циклического нагружения.

Библиографический список

1. Братухин, А.Г., Абрамов, Б.М., Арутюнов, С.Г. и др. Авиастроение: Летательные аппараты, двигатели, системы, технологии. // М.: Машиностроение. 2000. 536 с.
2. Джесси Рассел. Гидроабразивная резка. // Издательство «Книга по требованию». 2013 240 с.
3. Скуратов, Д. Л., Швецов, А.Н. Определение рациональных условий формообразования и упрочнения поверхностей деталей на операциях механической обработки. // М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королёва (Самар. ун-т). Самара: Изд-во Самар, ун-та. 2017. 112 с.
4. Монахов, Г.А., Жданович, В.Ф., Радинский, Э.М. и др. Обработка металлов резанием: справ. технолога // М.: Машиностроение, 1974. 598 с.
5. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов. // М.: Машиностроение, 1989. 304с.
6. Avanish Kumar Debay, Vinod Vadava, Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet. // Journal of materials processing Technology. 2008.
7. Гречников, Ф.В., Горшков, Ю.С., Мишин, А.М. Исследование влияния способа раскроя листовой алюминиевой заготовки на трещинообразование при холодной листовой штамповке. // Известия Самарского научного центра РАН. Том 17. 2015. С.454-457.
8. Филатов, Э. Я., Павловский В. Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. // Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.

УДК 629.7.002:621.981

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК СТРИНГЕРОВ ПАНЕЛЕЙ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА В СВЕЖЕЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ.

Марковцев В. А.¹, Попов А. Г.², Чаплыгин Е. А.³

1 – д.т.н. генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ»

2 – к.т.н., генеральный директор ООО «Авиапрофиль»

3 – студент группы Омбд – 31 УлГТУ

Аннотация: Предлагается эффективная технология изготовления прямолинейных заготовок стрингеров панелей фюзеляжа самолета, в которой закалка производится когда исходный алюминиевый сплав находится в виде ленты. В последующем из свежезакаленной ленты гибкой-прокаткой на станке ГПС в процессе формообразования гнутого Z-образного профиля производятся прямолинейные заготовки стрингеров, с которыми не надо производить термообработку и правку.

Ключевые слова: Гнутые Z-образные профили, гибочно-прокатный станок, закалка, заготовка стрингера, лента, свежезакаленное состояние, специальная катушка.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING BLANKS OF STRINGERS OF AIRCRAFT FUSELAGE PANELS IN A FRESHLY HEATED STATE.

Markovtsev V. A.¹, Popov A. G.², Chaplygin E. A.³

1 – Doctor of Technical Sciences, General Director of Ulyanovsk NIAT JSC

2 – Candidate of Technical Sciences, General Director of Aviaprofil LLC

3 – student of the OMbd – 31 UISTU group

Abstract: An effective technology is proposed for the manufacture of rectilinear billets of stringers of aircraft fuselage panels, in which quenching is performed when the initial aluminum alloy is in the form of a tape. Subsequently, straight-line blanks of stringers are produced from the freshly baked flexible-rolling tape on the GPS machine during the shaping of the bent Z-shaped profile, with which it is not necessary to perform heat treatment and straightening.

Keywords: Bent Z-shaped profiles, bending and rolling machine, hardening, stringer billet, tape, freshly baked condition, special coil.

В настоящее время на Филиале ПАО «Ил» - Авиастар гнутые Z-образные тонкостенные профили для стрингеров панелей фюзеляжа самолета МС-21 изготавливаются из ленты алюминиевого сплава В95 в состоянии поставки после отжига (состояние М). Формообразование профилей выполняется на автоматизированной гибочно-прокатной линии со станком ГПС-350, разработанной и изготовленной АО «Ульяновский НИАТ» [1]. Далее производится термообработка (закалка) прямолинейных профилей, длина которых достигает 8,5 м, а затем правка профилей растяжением на

гидравлических прессах ПГР. И термообработка и правка габаритных профилей не технологичны, связаны с высокими затратами на оборудование и энергоресурсы.

На рис. 1 представлены образцы гнутых Z-образных тонкостенных профилей из алюминиевого сплава В 95, которые предлагается изготавливать из ленты в свежезакаленном состоянии.

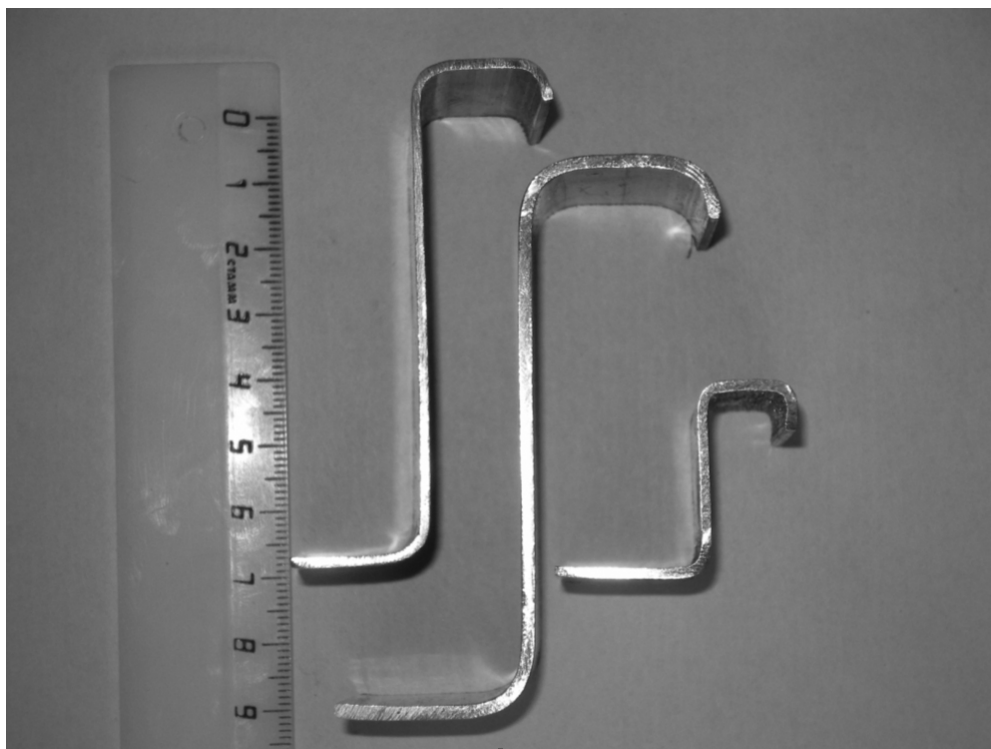


Рис. 1. Гнутые Z-образные тонкостенные профили из алюминиевого сплава В 95

По предлагаемой технологии термообработка (закалка) производится, когда исходный алюминиевый сплав находится в состоянии ленты заданной ширины и длины на специальных катушках [2]. Количество материала располагающегося на этих катушках и его параметр определяются производственным заданием на изготовление заготовок стрингеров. Термообработка ленты из алюминиевого сплава на компактных специальных катушках позволяет использовать электротермические агрегаты с небольшими рабочими камерами и существенно экономить энергоресурсы на нагрев оборудования.

В последующем изготовление Z-образного гнутого профиля из свежезакаленной ленты алюминиевого сплава производится на автоматизированной линии с гибочно-прокатным станком ГПС-350. На выходе могут быть получены прямолинейных или изогнутые за заданный радиус продольной кривизны Z-образные профильные заготовки стрингеров, которые не требуют последующей термообработки (закалки), а получают повышенную прочность и твердость естественным старением. Таким образом, происходит совмещение процессов формообразования и правки гнутых тонкостенных профилей. Реализация данной технологии предполагает доработку гибочно-прокатного станка ГПС-350, отработку технологических операций термообработки и формообразования в условиях действующего производства, т. к. свежезакаленное состояние алюминиевого сплава в специальной катушки после термообработки (закалки) сохраняется в производственных условиях не более 2 часов.

Внедрение предлагаемой технологии изготовления заготовок стрингеров не только упрощает процессы термообработки (закалка производится на специальных катушках), но и экономит материал на технологических припусках, а также исключает необходимость в правке заготовок стрингеров растяжением (снижаются трудозатраты).

Библиографический список

1. Марковцев В.А., Баранов А.С., Попов А.Г., Левшонков Н. В. Совершенствование технологий продольной гибки профильных авиационных деталей // Изв. вузов. Авиационная техника, 2020.-№4.-с. 201-203.
2. Попов А.Г., Марковцев В.А. Разработка технологии изготовления прямолинейных заготовок стрингеров самолета МС-21 в свежезакаленном состоянии // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт

внедрения и перспективы развития: Тез. докл. V Междунар. научно- практ. конф. (24-25.11. 2016 г.). – Ульяновск : УлГУ, 2016 с. 81-82.

УДК 621.22

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ СОВМЕЩЕННОЙ С ОТБОРТОВКОЙ

Титов Ю.А.¹ Титов А.Ю.²

1 - к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск.

2 - к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск.

Аннотация. В статье представлены результаты проведенного исследования по разработке методики определения возможностей интенсификации формообразования деталей типа тел вращения с отверстием в донной части вытяжкой – отбортовкой. Разработан алгоритм Алгоритм расчета основных технологических параметров процесса вытяжки совмещенной с отбортовкой.

Ключевые слова: деталь с отверстием, вытяжка – отбортовка, преимущественный вид деформирования, управляющие факторы.

ALGORITHM FOR CALCULATION OF THE MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE DRAWING PROCESS COMBINED WITH FLASHING

Titov Yu.A.¹, Titov A.Yu.²

1 - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and OMD, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk.

2 - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and OMD, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk.

Abstract. The article presents the results of a study on the development of a methodology for determining the possibilities of intensifying the shaping of parts such as bodies of revolution with a hole in the bottom part of the hood - flanging. An algorithm has been developed for calculating the main technological parameters of the process of drawing combined with flanging.

Key words: detail with a hole, hood - flanging, predominant type of deformation, control factors.

Анализ патентного поиска при изучении вопросов, связанных с интенсификацией процесса изготовления осесимметричных деталей с отверстием в донной части (за счет управляющих факторов) выявил ряд способов их реализации путем уменьшения растягивающих тангенциальных напряжений и создания сжимающих радиальных напряжений. В работах 1,2,3 представлены экспериментальные данные, позволяющие сделать вывод, что такими факторами являются торцевое поджатие кромки отверстия и прижим фланца.

Экспериментальные исследования показывают, что воздействие управляющих факторов на процесс вытяжки-отбортовки позволяет увеличить КИМ на 10-15%.

При изготовлении деталей типа тела вращения с отверстием в донной части за счет управляющих факторов (торцевое поджатие кромки отверстия, прижим фланца) предлагаем следующий алгоритм:

1. Рассчитать меридианальные напряжения [1]:

σ_ρ — напряжение в донной части

σ_D — напряжение во фланцевой части

2. Определить соотношение напряжений и преимущественный вид деформаций:

для определения преимущественного вида деформирования необходимо из двух напряжений выбрать минимальное:

$$\sigma_\rho^{dom} = \min\{\sigma_{\rho_{max}}^d, \sigma_{\rho_{max}}^D\}.$$

- 1) Если $\sigma_\rho < \sigma_D$ — преимущественным видом деформации является отбортовка;

- 2) Если $\sigma_\rho > \sigma_D$ — преимущественным видом деформации является вытяжка;

- 3) Если $\sigma_\rho = \sigma_D$ — происходит совмещенная вытяжка и отбортовка, процесс не стабилен.

3. Определить необходимость влияния на формообразование.

Для увеличения КИМ за счет уменьшения диаметра заготовки необходимо задействовать в процессе деформирования донную часть заготовки, прилегающую к отверстию. Возможны следующие технические решения:

- 1) При $\sigma_\rho < \sigma_D$ — необходимо частично задействовать фланцевую часть заготовки за счет:

- а) прижима донной части заготовки;
- б) прижима цилиндрической части полуфабриката.

2) При $\sigma_p > \sigma_D$ необходимо интенсифицировать деформацию донной части заготовки:

- а) увеличить прижим фланца (ступенчато или плавно);
- б) увеличить силу торцевого поджатия кромковой части заготовки.

4. Определить необходимые значения торцевого поджатия или усилия прижима [2].

На рисунке 1 представлен алгоритм расчета основных технологических параметров процесса вытяжки совмещенной с отбортовкой основанный на определении возможностей интенсификации формообразования за счёт торцевого поджатия кромки отверстия или прижима фланца.

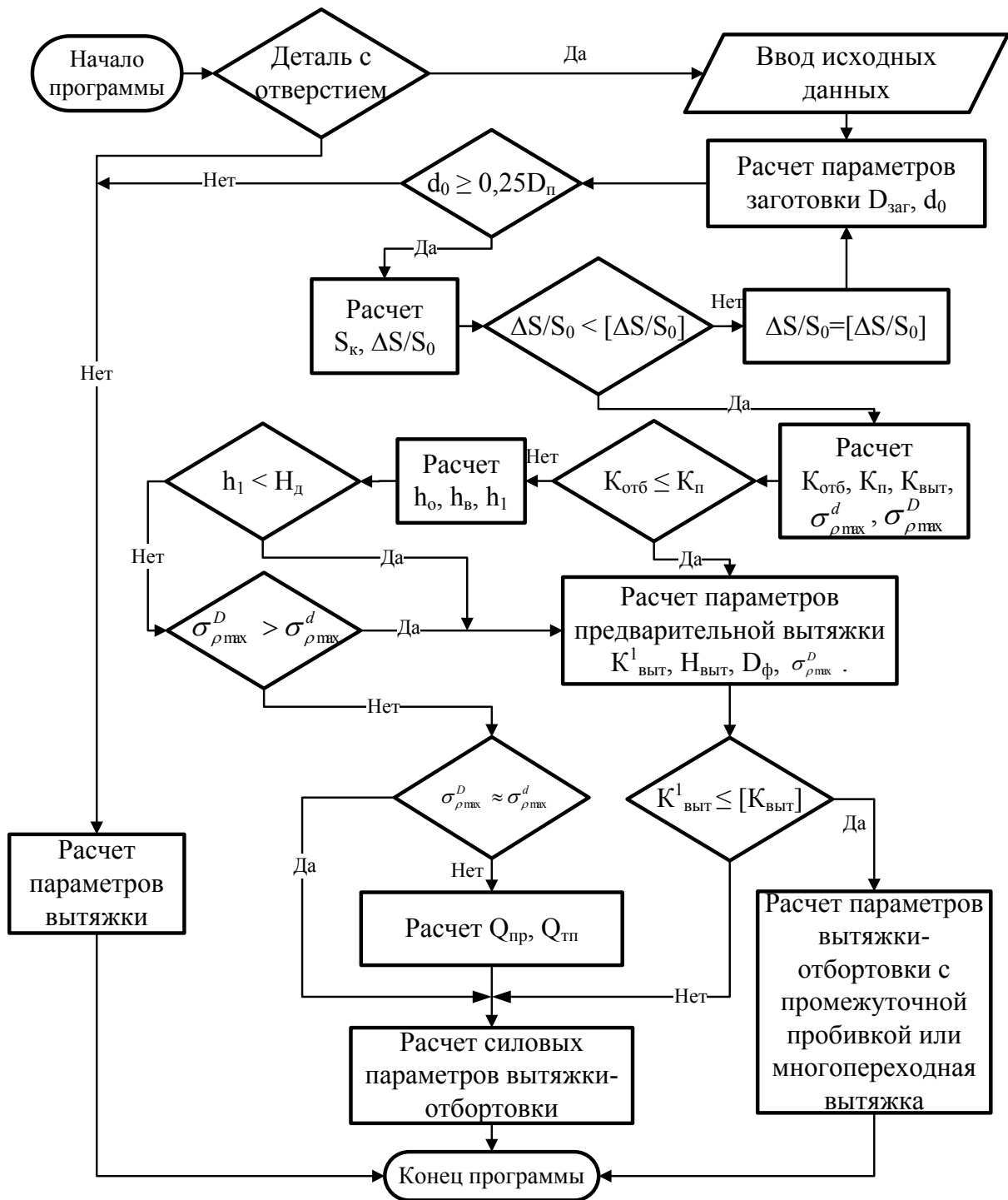


Рис. 1. Алгоритм расчета основных технологических параметров процесса вытяжки совмещенной с отбортовкой

Библиографический список

1. Титов А.Ю. Этапы методики определения параметров интенсификации процессов вытяжки-отбортовки осесимметричных деталей.: Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. №11-1. с. 167-171.

2. Титов А.Ю. Титов Ю.А. Филимонов В.И. Разработка металлосберегающих технологий вытяжки-отбортовки осесимметричных деталей с отверстием в дне на основе анализа закономерностей деформации при наличии управляющих факторов : Ульяновск, УлГТУ, 2021. – 162 с.

УДК 621.981

ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Турундаев К.В.

*к.т.н., ведущий инженер-конструктор АО «Ульяновский НИАТ», г. Ульяновск
e-mail: ulniat2012@rambler.ru*

Аннотация. Статья посвящена вопросам повышения качества профилей для продольно – поперечного силового набора летательных аппаратов. Автор решает задачу анализа технологии изготовления профилей по требуемым показателям качества. Разработан метод изготовления профилей, даны технологические рекомендации.

Ключевые слова: профиль, профилирование, летательный аппарат, метод интенсивного деформирования

ONE OF THE METHODS TO IMPROVE THE QUALITY OF PROFILES FOR AIRCRAFT PRODUCTS

Turundaev K.V.

*Ph.D., leading design engineer, JSC "Ulyanovsk NIAT", the city of Ulyanovsk
e-mail: ulniat2012@rambler.ru*

Abstract. The article is devoted to the issues of improving the quality of profiles for the longitudinal - transverse power set of aircraft. The author solves the problem of analyzing the technology for manufacturing profiles according to the required quality indicators. A method for manufacturing profiles has been developed, and technological recommendations have been given.

Key words: profile, profiling, aircraft, intensive deformation method

Важной проблемой при производстве изделий авиакосмической техники является изготовление профилей обладающих высокими показателями качества [1]. Это определяется требованиями снижения стоимости изделия, увеличение срока эксплуатации летательных аппаратов и т.д.

Существуют различные методы для получения профилей, характеризующиеся рядом способов и соответствующие им устройства: профилирование в роликовых парах (традиционное профилирование, стесненный изгиб, метод интенсивного деформирования); получение в кромкогибе; изготовление штамповкой; волочение через инструментальную фильеру; изготовление прессованием. Каждый из этих методов обладает

рядом положительных и отрицательных сторон. Соответственно, каждый из этих методов занимает свою нишу в производстве профилей.

Характер занимаемой ниши определяется по следующим факторам:

1. Для чего профиль требуется.
2. Необходимый допуск на линейные размеры профиля.
3. Геометрия зоныгиба, т.е. какой нужен внутренний радиусгиба, необходимы ли локальные утолщения.
4. Применяемые материалы (титановые, алюминиевые, алюминийеволитиевые сплавы, сталь, полимерно-композиционные), а также насколько они пластичны.
5. Типоразмеры профиля – его высота, ширина, длина.
6. Наличие соответствующего оборудования по производству профилей на производстве.

При анализе методов получения профилей была составлена схема [2], где характеризующим признаком было приложение тягового усилия: перед областьюгиба; в областигиба (многоточечное или по всей длине); за областьюгиба. И наилучшие условия напряженно-деформированного состояния при формообразовании заготовки будет при приложении тягового усилия по всей длине, где происходитгибка. Для реализации данного условия автором был разработан новый способ (метод) и обеспечивающее его устройство по изготовлению профилей (рис.1) [3].

Суть способа заключается в закреплении инструментальной фильеры 2 с помещенной в ее заходную часть 5 заготовки 1 на линейном электродвигателе (ЛЭД) 3. При подаче тока в обмотку статора ЛЭД мы получим бегущее магнитное поле. Далее это поле наведет в заготовке вихревые токи, где она (заготовка) исполняет в данной конструкции роль ротора (вторичная электропроводящая часть). При совместном взаимодействии бегущего магнитного поля и вихревых токов мы получим тяговое усилие, которое будет перемещать заготовку через

инструментальную фильеру, вслед за бегущим магнитным полем, до получения готового профиля 4 на выходе из неё.

Усилие необходимое для протягивания заготовки через инструментальную фильеру определим по работе, посвященной волочению [4]. Мощность и усилие, обеспечиваемые ЛЭД можно определить и подобрать по следующим источникам [5, 6].

При использовании данного способа по сравнению с гибкой в роликах имеем следующее преимущества - приложение тягового усилия по всей длинегиба и создания объемного напряжено-деформированного состояния. Что предотвращает утонение, и соответственно улучшает показатель качества технологичности и надежности; малая металлоемкость оборудования, что улучшает показатель качества технологичности и экономичности.

Таким образом, на основании вышеизложенного видно, что разработанный новый метод изготовления профилей позволяет повысить требуемые показатели качества профилей с минимальными капитальными затратами, т.е. оптимизировать параметры оборудования и инструмента.

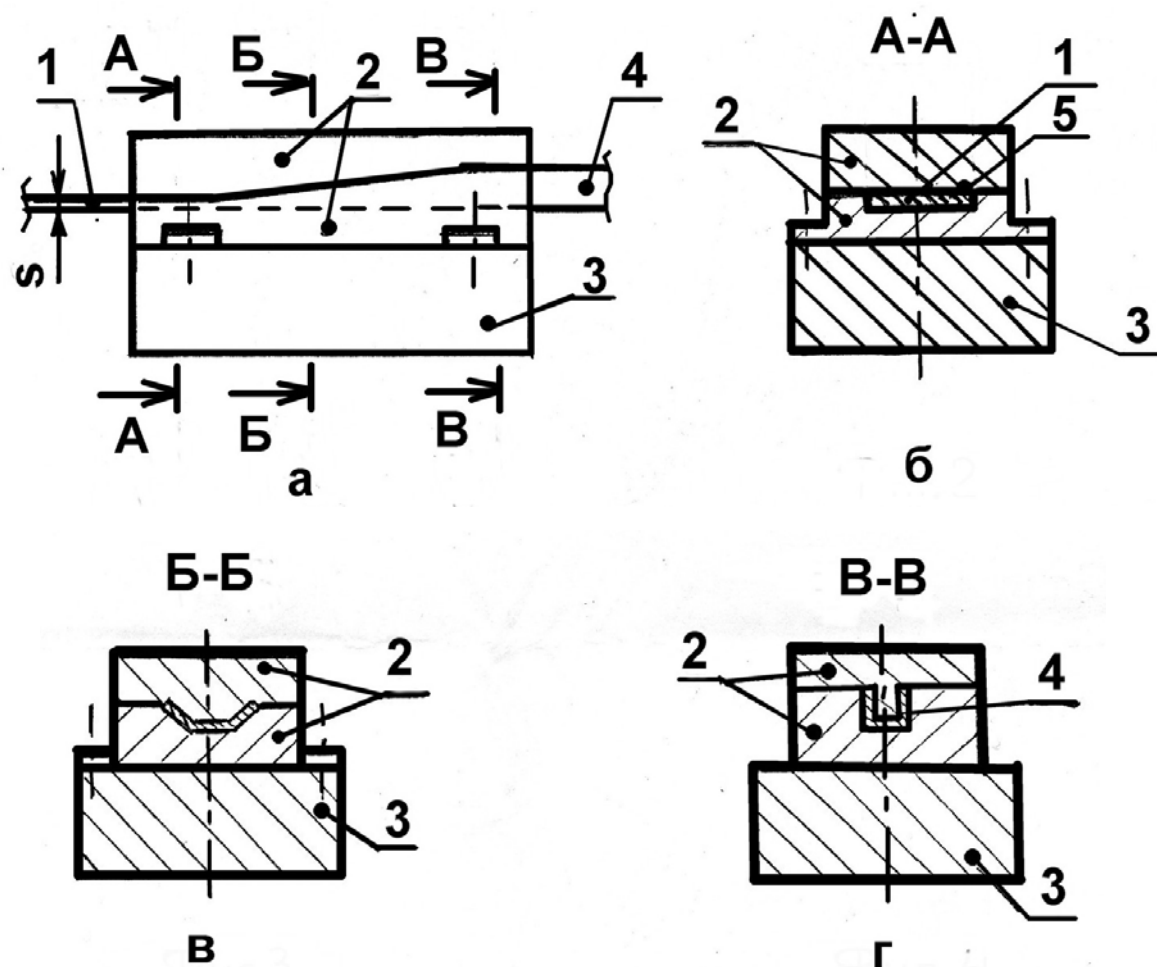


Рис.1. Устройство изготовления профилей с применением ЛЭД:
а – вид сбоку; б – сечения А-А; в – сечение Б-Б; г – сечение В-В.

1 – заготовка; 2 – инструментальная фильера; 3 – линейный электродвигатель (ЛЭД); 4 – готовый профиль; 5 – заходной участок фильеры.

Библиографический список

1. Мазур, И.И. Управление качеством [Текст] / И.И. Мазур, В.Д. Шапиро. - 2-е изд. - М.: Омега-Л, 2005. – 400 с.
2. Турундаев, К.В. Один из вариантов повышения качества профилей для изделий авиационной техники [Текст] / К.В. Турундаев // Наука, теория,

практика авиационно – промышленного кластера современной России: Материалы VI международной научно-производственной конференции, приуроченной ко дню российской науки (г. Ульяновск, 2021 г.). – Ульяновск: УлГТУ, 2021. – С.27-37.

3. Патент №2245205 РФ, МПК⁷ В 21 D 5/06. Способ изготовления профилей из электропроводящих материалов и устройство для его осуществления [Текст] / Колганов И.М., Турундаев К.В., Марковцев В.А. и др.- опубл. в Б.И. 27.01.2005 № 3.

4. Колганов, И.М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования [Текст] / И.М. Колганов. - Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 108 с.

5. Насар, С.А. Линейные тяговые электрические машины [Текст] / С.А. Насар, И. Болдеа. – М.: Транспорт, 1981.

6. Свечарник, Д.В. Электрические машины непосредственного привода: Безредукторный электропривод [Текст] / Д.В. Свечарник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.

Секция 4

**«Гуманитарные науки в авиационно-
космических технологиях»**

УДК 621.010

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ НА КАФЕДРЕ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ» УлГТУ

Кокорин В.Н.¹, Корчакин А.С.², Чаплыгин Е.А.²

1 – д.т.н., профессор каф. «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск.

2 – студенты машиностроительного факультета УлГТУ г. Ульяновск

Аннотация. Рассмотрены основные направления научно-исследовательской деятельности кафедры «Материаловедение и ОМД».

Ключевые слова: кафедра, университет, научные направления.

STATUS AND PROSPECTS OF SCIENTIFIC RESEARCH WORKS AT THE DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND METAL PRESSURE PROCESSING, UIGTU

Kokorin V.N.¹, Korchakin A.S.², Chaplygin E.A.²

1 - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department. "Materials Science and OMD" UIGTU, Ulyanovsk.

2 - students of the mechanical engineering faculty of Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk

Abstract. The main directions of research activities of the department "Materials Science and OMD" are considered.

Key words: department, university, scientific directions.

С момента организации кафедры (1958 г.) её сотрудниками проводились научно-исследовательские работы в рамках госбюджета, хоздоговорных, а также инициативных работ по изучению как характеристик компактных и структурнонеоднородных материалов, так и разработка новых и усовершенствование традиционных технологических процессов деформирования листовых и объёмных материалов в холодном и горячем состояниях [1].

Основными направлениями научно-исследовательской работы в настоящее время являются:

1. Исследование процесса повышения стойкости штампового инструмента листовой штамповки. Исследование процессов упрочнения поверхностного слоя штампового инструмента при использовании

упрочняющих покрытий. Исследование трещинообразования поверхностного слоя штампового инструмента;

2. Исследование процессов интенсивного уплотнения гетерофазных увлажненных смесей. Исследование влияния температуры и УЗ колебаний на процесс консолидации дисперсных материалов; влияние локализованного сдвига на процесс интенсивного уплотнения при достижении плотности теоретического уровня;

3. Теоретические и экспериментальные исследования в области профилирования. Исследование формообразования Z-образных профилей. Исследование формообразования закрытых и полузакрытых профилей.

В последнее время активно развиваются исследования в рамках изучения явления межкристаллической коррозии. С начала 2000-х годов в Ульяновском государственном техническом университете совместно с учеными Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого проводятся исследования явления термомеханохимических процессов при реализации схемы интенсивного уплотнения увлажненных гетерофазных механических смесей на основе железа. Результатом термомеханохимических реакций при интенсивном пластическом деформировании и локализованном сдвиге на участках пор в процессе интенсивного уплотнения увлажнённых гетерофазных механических смесей является возникновение условий имплантации ионов водорода в металл, имеющего остаточную пористость; создание защитной водородной плёнки водорода на металлической поверхности образующих боковых стенок пор; удаление кислорода из межзёрненного пространства в местах локализации пор, в результате теплового воздействия при «холодном спекании»; пассивация материала матрицы-основы и образование оксидной защитной плёнки на участках несплошности (поры) структуры.

Обнаружен и описан механизм структурирования при реализации термомеханохимических реакций и имплантации ионов водорода в виде атомарно-молекулярной восстановительной (защитной) пленки при локализованном сдвиге структурно неоднородных гетерофазных механических смесей на основе железа.

По результатам научно-исследовательской работы было защищено пять докторских диссертаций и двенадцать кандидатских диссертаций.

Библиографический список

1. Кокорин В.Н. 50 лет кафедре «Материаловедение и ОМД» УлГТУ // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 5. – С. 29-32.

СОДЕРЖАНИЕ

Приветственное слово		
Секция 1 «ЗАГОТОВИТЕЛЬНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В МАШИНОСТРОЕНИИ»		
1	<p>ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТЕЛЛАЖНОЙ СТОЙКИ ДЛЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЦЕХОВ В АВИАСТРОЕНИИ Марковцев В.А., Илюшкин М.В., Марковцева В.В., Филимонов В.И.</p> <p>MANUFACTURING TECHNIQUE OF RACK UPRIGHT FOR BLANKING SHOPS IN AIRCRAFT INDUSTRY Markovtsev V.A., Pushkin M.V., Markovtseva V.V., Filimonov V.I.</p>	
2	<p>ПРАВКА В РОЛИКАХ ПРЕССОВАННЫХ И ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Марковцев В. А., Попов А. Г., Карпов А. В.</p> <p>EDITING IN THE ROLLERS OF PRESSED AND BENT PROFILES MADE OF ALUMINUM ALLOYS Markovtsev V. A., Popov A. G., Karpov A. V.</p>	8
3	<p>РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГOTOBOK СТРИНГЕРОВ ПАНЕЛЕЙ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА В СВЕЖЕЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ Марковцев В. А., Попов А. Г., Чаплыгин Е. А.</p> <p>DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING BLANKS OF THE AIRCRAFT FUSELAGE STRINGERS PANELS IN A FRESHLY HEATED STATE Markovtsev V. A., Popov A. G., Chaplygin E. A.</p>	2
Секция 2 «ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ И АВТОМАТИЗАЦИЯ»		
4	<p>НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ (ОБЗОР) Гульшин В.А., Филимонов С.В., Филимонов В.И.</p> <p>SOME ISSUES OF DESIGN AND MANUFACTUREING OF ROLL-FORMED PROFILES (REVIEW)</p>	7

	Gulshin V.A., Filimonov S.V., Filimonov V.I.	
5	<p>АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБТЯЖКИ НА ОБТЯЖНОМ ПРЕССЕ FEKD</p> <p>Михеев В.А., Демидова М.М., Тарасов С.В.</p> <p>ANALYTICAL METHOD FOR ENSURING CONSISTENT TIGHTNESS ON A TIGHT PRESS FEKD</p> <p>Mikheev V.A., Demidova M.M., Tarasov S.V.</p>	7
6	<p>МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ</p> <p>Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н.</p> <p>MODELING THE WEAR OF A SHEET STAMPING TOOL WITH A WEAR-RESISTANT COATING</p> <p>Morozov O.I.¹, Tabakov V.P.², Kokorin V.N.</p>	9
7	<p>КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОГО ГОФРИРОВАНИЯ ТРУБ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ШАРИКОВОЙ ФИЛЬЕРЫ В ПРОГРАММЕ LS-DYNA</p> <p>Поворов С.В.¹, Бузаев Д.А.</p> <p>FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE PROCESS OF LONGITUDINAL CORRUGATIONS FORMING ON STAINLESS STEEL TUBES OF CIRCULAR SECTION BY MEANS OF BALL DIES IN LS-DYNA</p> <p>Povorov S.V.¹, Buzaev D.A.</p>	5
<p>Секция 3</p> <p>«ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА»</p>		
8	<p>О ПОТРЕБНОМ КОЛИЧЕСТВЕ КЛЕТЕЙ ДЛЯ ФОРМОВКИ ПРОФИЛЕЙ КОРОБЧАТОГО ТИПА</p> <p>Гульшин В.А.¹, Филимонов А.В.², Филимонов В.И.</p> <p>ON A REQUIRED NUMBER OF PASSES TO FORM THE BOX-TYPE PROFILES</p> <p>Gulshin V.A.¹, Filimonov A.V.², Filimonov V.I.</p>	0
9	<p>КОЛИЧЕСТВО ВАЛКОВ, ТРУДОЁМКОСТЬ ИХ ОБРАБОТКИ И СЕБЕСТОИМОСТЬ КОМПЛЕКТА ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ</p> <p>Гульшин В.А., Филимонов С.В., Филимонов В.И.</p>	9

	<p>NUMBER OF ROLLS, WORK CONTENT AND PRODUCTION COST OF A ROLL SET FOR ROLL-FORMING</p> <p>Gulshin V.A., Filimonov S.V., Filimonov V.I.</p>	
10	<p>АЛГОРИТМ РАСЧЁТНЫХ ПРОЦЕДУР ВЫБОРА ПРОФИЛИРОВОЧНОГО СТАНКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЗАДАННОГО СЕЧЕНИЯ</p> <p>Гульшин В.А., Филимонов А.В., Филимонов В.И.</p> <p>CALCULATING PROCEDURES ALGORITHM TO CHOOSE A ROLL-FORMING MACHINE TO MANUFACTURE A PROFILE OF DEFINITE CROSS-SECTION</p> <p>Gulshin V.A., Filimonov A.V., Filimonov V.I.</p>	07
11	<p>СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИОННОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ</p> <p>Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В.</p> <p>MODERN PROCESSES OF IONNOPLASMA SPRAYING DUE TO MECHANICAL ACTIVATION OF THE WORKING SURFACE</p> <p>Kokorin V.N., Morozov O.I., Mishov N.V.</p>	16
12	<p>ЗАВИСИМОСТЬ УСЛОВНОГО ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ОТ СПОСОБА РАСКРОЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА</p> <p>Матвеева К.Ф.¹, Горшков Ю.С.², Павлов В.Ф.</p> <p>INFLUENCE OF SHEET BILLET MADE OF D16AT ALLOY CUTTING METHOD ON A CONDITIONAL ENDURANCE LIMIT</p> <p>Matveeva K.F.¹, Gorshkov Yu.S.², Pavlov V.F.</p>	20
13	<p>РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК СТРИНГЕРОВ ПАНЕЛЕЙ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА В СВЕЖЕЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ</p> <p>Марковцев В. А., Попов А. Г., Чаплыгин Е. А.</p> <p>DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING BLANKS OF STRINGERS OF AIRCRAFT FUSELAGE PANELS IN A FRESHLY HEATED STATE</p> <p>Markovtsev V. A., Popov A. G., Chaplygin E. A.</p>	25
14	<p>АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ</p>	

	<p>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ СОВМЕЩЕННОЙ С ОТБОРТОВКОЙ Титов Ю.А., Титов А.Ю.</p> <p>ALGORITHM FOR CALCULATION OF THE MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE DRAWING PROCESS COMBINED WITH FLASHING Titov Yu.A.¹, Titov A.Yu.</p>	29
15	<p>ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ Турундаев К.В.</p> <p>ONE OF THE METHODS TO IMPROVE THE QUALITY OF PROFILES FOR AIRCRAFT PRODUCTS Turundaev K.V.</p>	34
<p>Секция 4 «ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ В АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ»</p>		
16	<p>СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ НА КАФЕДРЕ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ» УлГТУ Кокорин В.Н., Корчакин А.С., Чаплыгин Е.А.</p> <p>STATUS AND PROSPECTS OF SCIENTIFIC RESEARCH WORKS AT THE DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND METAL PRESSURE PROCESSING, UISTU Kokorin V.N., Korchakin A.S., Chaplygin E.A.</p>	40

Научное электронное издание

**НАУКА, ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА АВИАЦИОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КЛАСТЕРА
СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ**

Материалы VII Международной научно-производственной конференции,
приуроченной ко Дню российской науки
(г. Ульяновск, 2022 г.)

Сборник научных трудов

Отв. за выпуск В. В. Марковцева

ЛР № 020640 от 22.10.97

Дата подписания к использованию 15.06.2022.

ЭИ № 1699. Объем данных 4,2 Мб. Заказ № 274.

Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Тел.: (8422) 778-113

Е-mail: venec@ulstu.ru

venec.ulstu.ru