

УДК 621.015

ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2015 Ф.В. Гречников, С.Ф. Тлустенко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

Изложены основные понятия теории, методики и практики формообразования монолитных панелей различной формы и назначения, применяемых для изготовления летательных аппаратов. Приведено обоснование способов выбора различных видов технологических процессов, обеспечивающих получение деталей заданной конструкции и точности. Представлена методика анализа эффективности деформации заготовок способами гибки на гибочных прессах и прокатки. Проведен анализ и описание многообразия типов монолитных панелей как сборочных единиц объектов сборки (агрегатов и планера) в зависимости от их конструкции и сложности форм поверхностей и обводов, условий применения. Представлены результаты теоретического исследования и анализа технологических процессов гибки, методы исследования и оценки технологичности изготовления различных типов монолитных панелей, выбора рекомендаций по их применению. Приведена методика анализа и синтеза технологических процессов формообразования монолитных панелей на базе эффективного программного обеспечения на этапах проектирования и изготовления панелей. *Ключевые слова:* формообразование монолитных панелей, упруго-пластическое деформирование металла, остаточные напряжения, концентраторы напряжений, усталостная прочность, схемы распределения усилий деформирования, напряженно-деформированное состояние, комплексный критерий формы сечения панели, анализ и синтез схем деформации.

Изготовление на современном уровне развития авиационной техники монолитных панелей, в том числе с такими конструктивными особенностями, как разнотолщинность подкрепленных оболочек одинарной или двойной знакопеременной кривизны, изготовленных совместно с различной конфигурацией и высоты элементами жесткости из одной плиты, в настоящее время не имеет достаточного теоретического обоснования способов выбора специальных технологических решений, анализа и оценки определенного вида и порядка операций предварительной механической или химической обработки исходных заготовок и режимов обработки, операций формообразования панелей, связанных с упруго-пластическим деформированием металла, что неизбежно приводит к возникновению в деталях остаточных напряжений и концентраторов напряжений. Для каждого типа панелей необходимо разрабатывать одновременно как специфические технологические способы компенсации и устранения остаточных деформаций, которые искажают конфигурацию готовой панели и вызывают отклонения от теоретического контура элементов конструкции изделия, так и конкретную методику формообразования.

Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением. E-mail: gretch@ssau.ru
Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: titan250@mail.ru

Кроме этого, нужно иметь теоретическое представление о характере влияния параметров техпроцесса на погрешности формы, свойства материала для определения требований к режимам исполнения операций, влияющих в наибольшей степени на отклонения от теоретически заданной формы профиля панели. Сложность моделирования процессов формообразования панелей принципиально обусловлена также и физической, геометрической и контактной нелинейностью процессов: В частности, исследование физической нелинейности как нелинейности определяющих соотношений свойств материала является необходимым условием моделирования процессов формообразования вследствие необходимости учета необратимых деформаций, которые могут быть описаны моделью упругопластического материала. Современные высокопрочные лёгкие сплавы требуют больших упреждающих перемещений при упругопластической деформации панелей, следовательно, без учета геометрической нелинейности в виде нелинейности уравнений равновесия и кинематических связей при описании изменения геометрии заготовки в процессе деформирования сложно провести объективное моделирование процессов формообразования для выбора усилий и степени деформации и условий разгрузки заготовки. Учет контактной нелинейности необходим при определении заранее неизвестной границы контакта заготовки и штамповой оснастки, а также сил, действующих в области их контакта.

В условиях автоматизации процессов формообразования панелей на базе оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) одним из эффективных способов формообразования геометрического контура монолитных панелей является гибка на прессах и прокатка на копирующе-гибочных прессах без снижения усталостной прочности изделия после процесса прессования. Следовательно, гибку как технологическую операцию деформации панелей следует классифицировать по признакам приложения внешних нагрузок при гибке моментом, гибке поперечной силой, гибке с растяжением или сжатием, а также по признаку формы и размеров деформируемых заготовок, параметров силового набора и др.

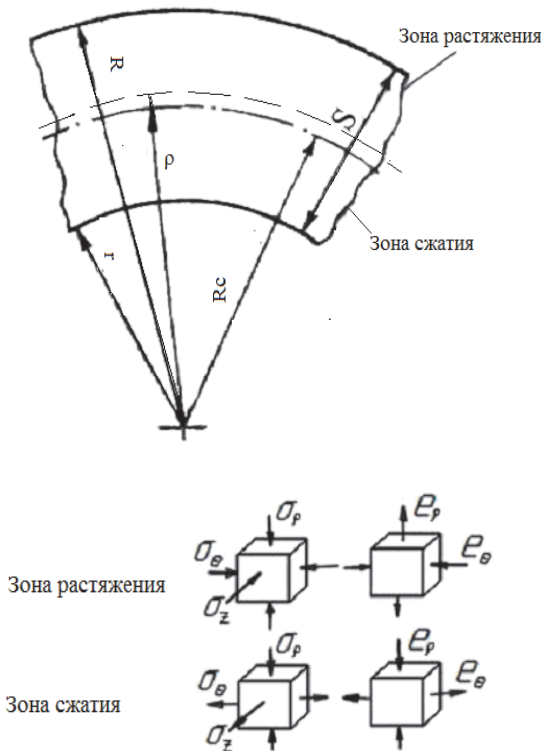


Рис. 1. Схема напряженно-деформированного состояния панели при гибке

Исследуем изгиб моментом плоской панели с отношением длины к ширине более трёх, с текущими радиусами кривизны наружной и внутренней поверхностей соответственно R и r, радиусом кривизны нейтрального слоя ρ и средней линии R_c. В процессе деформации слои, для которых R>ρ>r на деформируемом участке панели, будут испытывать удлинение в тангенциальном направлении (ε_θ>0), а слои, для которых R_c>ρ>r, испытывают сжатие (ε_θ<0) (рис.1), то есть имеет место объемно-напряженное и плоско-деформированное состояние, для которого необходимо определить условия упруго-пластической деформации. Анализ показал, что для описания условий упругопластического деформирования панелей при гибке наиболее применима теория малых упругопластических деформаций.

Наиболее опасным местом при изгибе заготовки является наружная поверхность заготовки и зоны радиусов перехода от ребер жесткости к полотну обшивки и в зонах разнотолщинности самого полотна обшивки, так как именно здесь зарождаются концентраторы напряжений, трещины и происходит разрушение заготовки при превышении предельных величин отношения r_{min}/S. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) участков панели в угловых зонах показал, что там применима схема плоской деформации, материал можно считать изотропным и несжимаемым, а компоненты тензора напряжений зависят только от одной из координат. Другие допущения могут формироваться по мере постановки и решения соответствующих задач.

Анализ процессов деформации для построения методики обоснования конструкции проектируемой оснастки, расчёта условий устойчивости процессов деформирования показал, что при гибке угловых зон на первых переходах в открытых калибрах схема внешних воздействий близка к схеме гибки с растяжением, а на последних переходах, где осуществляется гибка заготовки по наружному контуру, схема внешних воздействий близка к схеме гибки с торцевым сжатием. В первом случае заготовка, как правило, получает утонение, а во втором – утолщение. Для вычисления смещения нейтрального слоя и последующего определения изменения толщины панели в угловой зоне деформации применим метод расчёта по напряжениям для определения напряжений и положения нейтрального слоя, где уравнение равновесия угловой зоны имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \quad (1)$$

где σ_ρ, σ_θ – радиальное и тангенциальное напряжение соответственно; ρ – текущее значение радиуса. Зависимость утонения (утолщения) металла от внутреннего радиуса и угла гибки при упругопластическом деформировании панелей при гибке показана на рис. 2 и 3.

Построенная модель дает весьма близкие результаты к экспериментальным данным по

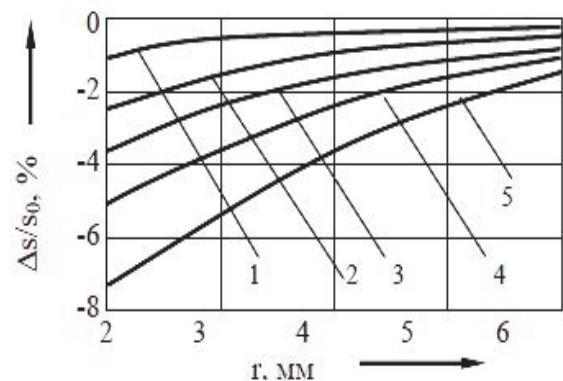


Рис. 2. Зависимость утонения от внутреннего радиуса и угла гибки

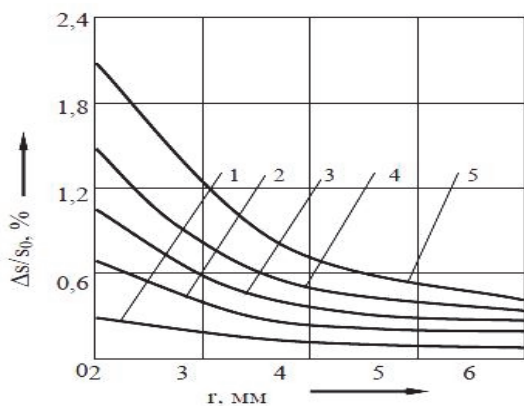


Рис. 3. Зависимость утолщения от внутреннего радиуса и угла гибки

утолщению угловых зон на первых переходах, где среднее утонение составляет 3–4 %. Таким образом, исследуемая модель изменения толщины криволинейных участков заготовки в зависимости от расклада силовых факторов предполагает увеличение утонения или утолщения с уменьшением радиуса изгиба и с увеличением угла гибки. Анализ расчета параметров заготовки по разработанной модели показал достаточную точность результатов для разработки технологического оснащения, сокращения сроков и затрат на освоение технологии, повышения качества панелей и предотвращения потери устойчивости деформируемых элементов панели.

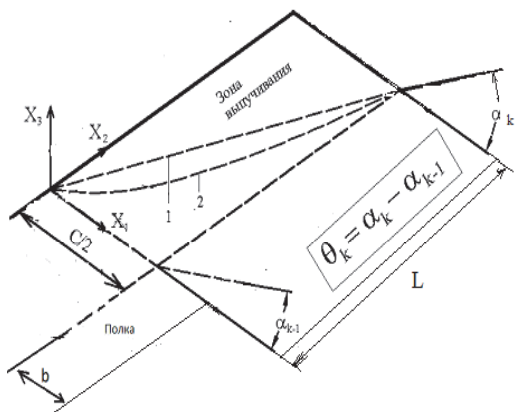


Рис. 4. Геометрические параметры панели в локальной системе координат:
1 – условная аппроксимация реальной границы пластической области;
2 – реальная граница пластической области

В этом случае исходная формула для определения деформации панели имеет вид:

$$e_n = -e_u - e_v = -e_u. \quad (2)$$

Следовательно, текущее значение деформации можно вычислить по формуле:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^2 \right). \quad (3)$$

Исследование механических свойств матери-

ала в зоне пластического формообразования необходимо выполнить на основе аналитического описания соотношений между напряжениями и деформациями, точность вычисления которых определяет сложность теоретических расчётов параметров формообразования и погрешность получаемых результатов. Для обеспечения практической применимости расчётной методики рассмотрим варианты аппроксимации кривой упрочнения материала панели (рис. 5).

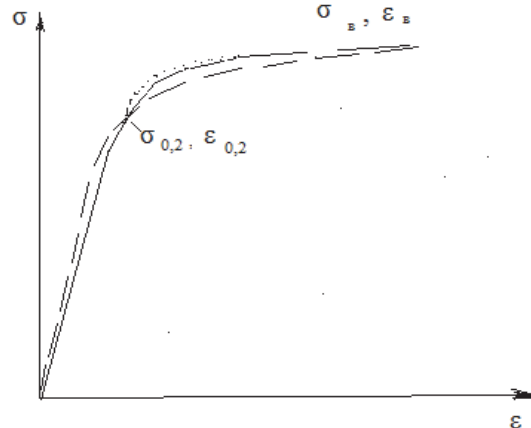


Рис. 5. Аппроксимация кривой упрочнения: сплошная линия – истинная кривая упрочнения; пунктирная линия – аппроксимация степенной функцией, точечная линия – линейно-степенной функцией

При степенной аппроксимации можно использовать для всего диапазона деформаций функцию вида:

$$\sigma = K \varepsilon^n,$$

где K – модуль упрочнения; n – показатель степенной аппроксимации кривой упрочнения.

Вышеприведенная зависимость применяется в области пластических деформаций при использовании линейно-степенного закона. Аппроксимирующая функция в упругой области имеет вид: $\sigma = E \varepsilon$, где E – модуль упругости материала. Тогда пересечение графиков степенной и линейно-степенной функций происходит при относительной деформации:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{K}{E} \right)^{1/1-n},$$

где константы K и n

зависят от механических свойств материала и определяются из условия прохождения аппроксимирующей кривой через точки условного предела текучести и предела прочности истинной кривой упрочнения по соотношениям (рис. 5):

$$n = \lg \frac{\sigma_e / \varepsilon_s}{\sigma_{0.2} / \varepsilon_{0.2}} = \lg \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{0.2}}, \quad K = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e^n},$$

где $\sigma_{0.2}$

– условный предел текучести материала, определяемый по заданному допуску на остаточную деформацию. Для аналитического описания схем изгиба широких заготовок, у которых ширина значительно больше толщины, можно принять схему плоского напряженно-деформи-

рованное состояния, для которого следует изменить приведенный модуль упругости K_{np} :

$$K_{np} = K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1+n}.$$

Практика теоретических расчётов остаточных величин пластических деформаций и упругого пружинения панелей с элементами комплексной формы сечения показывает, что эффективной может быть методика расчёта технологических параметров упругопластической гибки, основанная на определении сначала положения нейтрального слоя в изгибаемом сечении, а затем вычисления кривизны изгибаемого элемента

$$k_a = \frac{1}{R_a}$$

по нейтральному слою, что позволяет

определить расстояние от нейтрального слоя до границы зоны упругой деформации. Тогда расчёт в зоне упругих деформаций производится по линейной зависимости $\sigma = \varepsilon E$, а в зоне пластической деформации по степенной зависимости $\sigma = K_{np} \varepsilon^n$. Сечение панели при этом разбивается на характерные участки с элементами комплексной формы сечения, строятся эпюры напряжений по отдельным участкам, а затем производится интегрирование эпюр напряжений по площади поперечного сечения в координатах ZY по схеме:

$$b_1 E k_a \int_0^{y_c} y dy + b_2 E k_a \int_{y_c}^{y_u} y dy + b_2 K_{np} k_a^n \int_{y_u}^{y_{n+h_2}} y^n dy =$$

$$b_1 E k_a \int_0^{y_c} y dy + b_1 K_{np} k_a^n \int_{y_c}^{h_1 - y_u} y^n dy + b_3 K_{np} k_a^n \int_{h_1 - y_u}^{h_1 - y_u + h_3} y^n dy,$$

где b_1, b_2, b_3 - ширина по горизонтальной оси Z характерных участков сечения; E - модуль упругости материала; k_a - кривизна по нейтральному слою; y_i - расстояние от нейтрального слоя полка ребер жесткости элементов комплексного сечения; K_{np} - приведенный модуль упругости материала; k_a^n - кривизна в зоне пластической деформации. Тогда методом последовательных приближений в зоне деформации можно вычислить положение нейтрального слоя y_i , определяемое соотношением между кривизной нейтрального слоя и внешним изгибающим моментом:

$$M_z = k E J_{yn} + k^n K_{np} J_{nl}^i, \quad (4)$$

где J_{yn}, J_{nl} - моменты инерции относительно нейтральной оси соответственно упругой и пластически деформированной зон по высоте сечения, определяемые формой и кривизной деформируемого сечения. Описание состояния условного равновесия в зоне упругости может быть выполнено с использованием линейной зависимости между напряжениями и деформациями, где связь условной кривизны k^i и изгибаю-

щего момента M_z определяется соотношением:

$$M_z = k^i E J, \quad (5)$$

где J - момент инерции суммарной площади поперечного сечения относительно нейтральной оси. Остаточная кривизна пластически изогнутого элемента k_o может быть определена из совместного решения уравнений (4) и (5):

$$k_o = k_a \left[1 - (J_{yn} / J + K_{np} J_{nl}^i k^{n-1} / E J) \right]. \quad (6)$$

Рассмотрим методику расчёта технологических параметров упругопластической гибки, связанную с применением шаговой процедуры интегрирования уравнений по параметру деформирования (времени) t для фиксированной материальной точки. Требуется получить уравнения деформирования твердых тел, записанные в приращениях. Считаем шаг Δt достаточно малым. Предполагаем, что в момент t все искомые величины определены, то есть определяющее соотношение записывается в форме:

$$\sigma = C : \varepsilon, \quad (7)$$

где C - тензор четвертого ранга, компоненты которого в общем случае зависят от компонент тензоров напряжений и деформаций (и, возможно, их скоростей); здесь и далее точка над величиной обозначает материальную производную, то есть частную производную этой величины по параметру деформирования (времени) t для фиксированной материальной точки.

Тогда уравнение равновесия в слабой форме (уравнение принципа возможных перемещений или уравнение баланса виртуальных работ) таково:

$$\int_V \sigma : \delta \varepsilon dV = \int_V \rho f \cdot \delta u dV + \int_{S_i} T^* \cdot \delta u ds,$$

$$\forall \delta u (\delta u = 0 \subset S_u), \quad (8)$$

где σ и ε являются соответственно симметричными тензорами напряжений и деформаций; u -вектор перемещений; f -вектор объемных массовых сил, действующих на единицу массы тела; V -занимаемая деформируемым телом область в базовой отсчётной конфигурации; S -площадь замкнутой поверхности, ограничивающей область V ; S_u, S_T - локальные области поверхности S ($S = S_u \cup S_T, S_u \cap S_T = \emptyset$). На локальных поверхностях S_u, S_T заданы векторы перемещений и поверхностных сил $T \equiv N \cdot \sigma = \sigma \cdot N : u = u^*$ на S_u , где u^* - текущее заданное значение u на S_u , $N \cdot \sigma = T^*$ на S_T ; N -единичный вектор внешней нормали к поверхности S_T ; ρ -удельная плотность деформируемого материала в базовой отсчётной конфигурации; точка в аналитических зависимостях между тензорами и векторами обозначает операцию их внутреннего произведения как свертки по одному индексу; знак $(:)$ между тензорами обозначает операцию их внутренне-

го двойного произведения как свёртки по двум индексам; знаком (δ) обозначена вариация переменной таким образом, что $\delta u=0$ на S_u , то есть граничные условия на S_u являются главными, а на S_T - естественными.

Тогда кинематическое соотношение деформаций как связь тензора деформаций с тензором градиента перемещений имеет вид :

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T),$$

где ∇u - тензор градиента перемещений, где ∇ - набла-вектор, который определяется по отношению к начальной базовой конфигурации объема деформируемой панели; верхний индекс (T) обозначает операцию транспонирования.

Соответственно

$$\dot{\sigma} = C : \dot{\varepsilon}, \quad (9)$$

где C – тензор четвертого ранга, компоненты которого в общем случае зависят от компонент тензоров напряжений и деформаций (и, возможно, их скоростей); здесь и далее точка над величиной обозначает материальную производную, то есть частную производную этой величины по параметру деформирования (времени) t для фиксированной материальной точки. В частности, к материалам, определяющие соотношения которых записываются в виде (9), относятся упругопластические материалы. Компоненты тензора

C для теории упругопластического течения, как для случая идеального, так и для материала с изотропным упрочнением, зависят от свойств деформируемых материалов.

Таким образом, используя аналогичную методику теоретических расчётов параметров деформации панели, можно получить линейризованное уравнение равновесия в приращениях для расчёта параметров геометрической нелинейности в процессах деформирования панели, где в качестве отсчётной базовой конфигурации принимается начальная конфигурация панели, а не текущая деформированная в некоторый момент времени процесса формообразования t , где $\nabla \delta u (\delta u = 0 \subset S_u)$. Приведенная формулировка граничных условий при выборе определяющих соотношений упругопластического деформирования панелей с учётом относительно малых деформаций предпочтительна для постановки и решения задач формообразования панелей при геометрической нелинейности зависимостей параметров деформирования в условиях их пространственного напряженно-деформированного состояния. Исследование и анализ процессов деформации на базе программного комплекса DEORM -3D позволили получить значения текущих параметров деформации и напряжения по объему заготовки при заданных схемах деформации панелей, достаточно приближенные к расчётным.

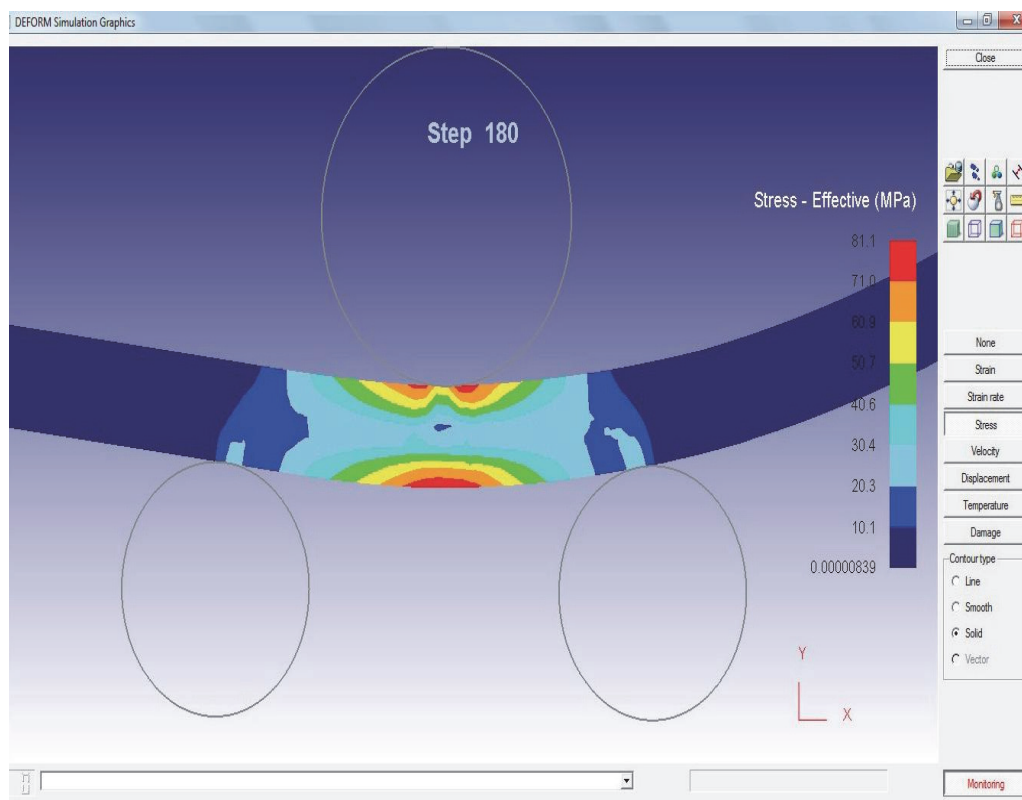


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние панели при формообразовании – гибке на опорах с регулируемым усилием на пуансоне на шаге 180

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гречников Ф.В., Ерисов Я.А.* Математическая модель анизотропного упругопластического материала // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 6(30). С. 73–79.
2. *Лысов М.И., Сосов Н.В.* Формообразование деталей гибкой. М.: Машиностроение, 2001. 388 с.
Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: Наука, 2004. 644 с. 387.
4. *Dierk Raabe, Franz Roters, Frederic Barlat, Long-Qing Chen.* Continuum Scale Simulation of Engineering Materials // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA April 5. 2004.
5. *Roters Franz, Eisenlohr Philip, Bieler Thomas R., Raabe Dierk.* Crystal Plasticity Finite Element Methods // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA July 23. 2010. 89.

**RESEARCH AND TECHNIQUE OF THEORETICAL JUSTIFICATION OF PARAMETERS
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF A SHAPING OF MONOLITHIC PANELS
FOR DESIGNS OF AIRCRAFT**

© 2015 F.V. Grechnikov, S.F. Tlustenko

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The basic concepts of the theory, the technique and practice of a shaping of monolithic panels of various form and appointment applied to production of aircraft are stated. Justification of ways of a choice of different types of the technological processes providing details of the set design and accuracy is given, the technique of the analysis of efficiency of deformation of preparations is presented in the ways are flexible on bending pressa and rollings on copy bending pressa. The description of variety of types of monolithic panels as assembly units of objects of assembly (units and glider) depending on their design and complexity of forms of surfaces and contours, application conditions is provided. Results of the purposeful analysis of technological processes are presented are flexible, methods of research and an assessment of technological effectiveness of production of various types of monolithic panels, a choice of recommendations about their application. The technique of the analysis and synthesis of technological processes of a shaping of monolithic panels on the basis of the effective software is given in design stages and production of panels. *Keywords:* a shaping of monolithic panels, elasto-plastic deformation of metal, residual tension, concentrators of tension, fatigue durability, schemes of distribution of efforts of deformation, the intense deformed state, complex criterion of a form of section of the panel, the analysis and synthesis of schemes of deformation.

Feodor Grechnikov, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Technics, Professor, Head at the Metal Forming Department. E-mail: gretch@ssau.ru
Stanislav Tlustenko, Candidate of Technics, Associate Professor. E-mail: titan250@mail.ru