



Пекарш А.И.¹, Олейников А.И.²

¹ОАО «Комсомольск-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина». РФ, г. Комсомольск-на-Амуре

²Комсомольск-на-Амуре государственный технический университет. РФ, г. Комсомольск-на-Амуре

ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОТРАБОТКА ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ СЛОЖНОЙ КРИВИЗНЫ И ГРАВЮРЫ

Математическое и компьютерное высокоточное моделирование лежит в основе современных методов решения комплексных научно-технических и технологических проблем авиационно-космического машиностроения с ориентацией на конечный инновационный результат. Такое моделирование может обеспечить:

- глубокую проработку технологии изготовления элементов конструкции и их заготовок-разверток, определение их технологичности уже на этапе проектирования;
- переход к компьютерной (виртуальной, электронной) отработке технологических процессов, исключение дорогостоящего, трудоемкого и длительного натурного уточнения оснастки, заготовки и параметров её обработки;
- изготовление детали «с первого раза», обусловленное глубиной моделирования всех процессов изготовления.

В данной статье это продемонстрировано применительно к технологиям изготовления из современных легких сплавов крупногабаритных обводообразующих монолитных панелей сложных аэродинамических форм для авиационной техники [1, 2].

Панели имеют большие габариты, двойную знакопеременную кривизну, разнотолщинность и сложную внутреннюю гравюру: нерегулярное оребрение с усилениями, карманами, подсечками и обнижениями, технологическими отверстиями и люками. Такие монолитные панели изготавливаются совместно с ребрами жесткости из одной плиты. Процесс изготовления состоит из двух разных этапов. Обычно первый из них заключается в создании фрезерованием плиты внутренней гравюры заготовки, второй – в получении заданной аэродинамической формы. Поскольку габариты наружной и внутренней поверхностей плоской заготовки должны непрерывно перейти в заданную геометрию панели в процессе изготовления, то эти этапы взаимосвязаны.

Несмотря на ряд известных преимуществ монолитных панелей перед сборными, специализированное оборудование для их гибки на рынке серийной продукции в настоящее время отсутствует. Поэтому, с точки зрения традиционных директивных технологий, они часто являются «нетехнологичными». Положение усугубляется ещё и уменьшением ресурса пластичности современных

сплавов, что может приводить к недостаточности запасов пластичности и допускаемых повреждений на процессы изготовления, к существенному уменьшению остаточной прочности готового изделия и диапазона его допустимых повреждений, на оценке которых основаны нормы лётной годности.

Указанные конструктивные, технологические и прочностные факторы обуславливают использование современного математического и компьютерного высокоточного моделирования при проектировании и отработке процессов изготовления с целью достижения требуемого качества геометрических и физико-механических характеристик панелей. Качество панели определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) и полем смещений, которые реализуются в процессах термосиловой обработки заготовки. Расчет смещений и НДС осуществляется методом конечных элементов. Принципиальные трудности моделирования этих процессов изготовления обусловлены их сильной и комбинированной нелинейностью: физической, геометрической и контактной. Вследствие необратимого деформирования необходим учет физической нелинейности, возникающей из-за больших упреждающих перемещений и пружинения – геометрической нелинейности, вследствие изменений области контакта заготовка-штамп, а также контактных сил – контактной нелинейности. Программирование фрезерования гравюры развертки обуславливает также необходимость пространственного высокоточного учета её элементов, несоизмеримо малых в сравнении с габаритами.

Для решения задач автоматизированного проектирования, моделирования, отработки и оптимизации 3D-развертки САД-модели панели, штамповой оснастки, трехмерного поля напряжений, способов и режимов обработки заготовки создана система РТПИРСЭМ [2] – **Р**азвертка, **Т**ехнологический **П**роцесс, **И**нструмент, **Р**асчетная **С**етка, **Э**лектронная **М**одель, структура которой приведена на рис. 1.

Интеграция между разрабатываемой в Unigraphics (Catia, Pro/ENGINEER, I-DEAS или других САД-пакетах) геометрической моделью панели и соответствующей её расчетной конечно-элементной моделью в Marc осуществляется посредством пре- и постпроцессоров Patran и Mentat.

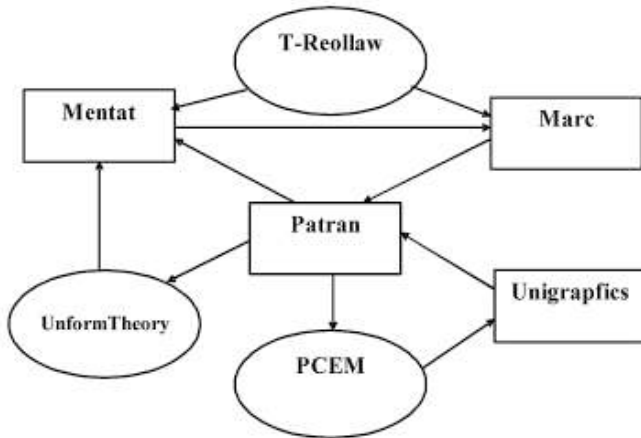


Рис. 1. Структурно-функциональная схема интегрированной системы РТПИРСЭМ

В системе может быть произведен весь требуемый комплекс технологических и прочностных расчетов для данного процесса термосилового обработки заготовки.

Система РТПИРСЭМ состоит из разработанного специализированного программного обеспечения T-Reollaw, UnformTheory, РСЭМ и общих пакетов нелинейного инженерного (Marc) и геометрического анализа (Unigrafics).

Фортран-программа T-Reollaw задаёт терморейологический закон поведения материала заготовки, который отсутствует в существующей базе моделей материалов пакета MSC.Marc. Входными данными этой программы являются характеристики диаграмм деформирования эталонного образца-свидетеля материала при заданном режиме и температуре деформирования. Выходные данные — компоненты тензора напряжений в точках интегрирования конечного элемента, рассчитанные согласно указанному закону поведения материала.

PCL-программа UnformTheory реализует итерационный алгоритм решения обратных задач по определению трехмерной (3D) конечно-элементной развертки САД-модели детали, упреждающей формы заготовки и рабочего контура штамповой оснастки. Алгоритм приближает вычисляемую развертку к искомой заготовке и сформованную из неё конфигурацию — к теоретической. Входными данными являются импортированная из САД-системы в MSC.Patran (PCL — командный язык этого пакета) геометрическая модель детали, параметры способа и режима формообразования и его припуск. Выходные данные — поверхностные расчетные сетки развертки-заготовки и рабочего контура оснастки, исключающие возникновение браковочных признаков техпроцесса.

Программа РСЭМ преобразует поверхностные расчетные сетки развертки-заготовки и рабочего контура оснастки в электронные модели UG,

пригодные для написания эффективных программ механообработки заготовок деталей и штампов в модуле САМ UG. Программа состоит из двух наборов подпрограмм: библиотеки структур и процедур, написанных на языке Компонентный Паскаль, и подпрограмм для исполнения под Unigrafics, написанных на языке C++, с использованием процедур интерфейса с Unigrafics — UG Open.

1. Модели деформирования материала заготовок.

Согласно экспериментальным данным [3] используем следующие модели деформирования материала заготовок. Пусть σ_{ij} , ϵ_{ij} — соответственно компоненты тензоров напряжений и деформаций в прямоугольной декартовой системе координат x_1, x_2, x_3 ; s_{ij} , e_{ij} — их девиаторы: $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{ij}\delta_{ij}/3$, $e_{ij} = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}\delta_{ij}/3$; $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$. Здесь и ниже по повторяющимся индексам проводится суммирование от 1 до 3.

Деформации ϵ_{ij} полные и представляют сумму упругих и неупругих деформаций:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^n \quad (1.1)$$

Для неупругих деформаций выполняется условие несжимаемости:

$$\epsilon_{ij}^n \delta_{ij} = 0.$$

Упругие деформации связаны с напряжениями законом Гука:

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1}{E} \left[(1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu \delta_{ij} \sigma_{kk} \right], \quad (1.2)$$

где E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона материала заготовки.

Неупругие деформации представляют сумму пластических деформаций и деформаций ползучести:

$$\epsilon_{ij}^n = \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^c. \quad (1.3)$$

Критерием достижения начального пластического состояния является условие Губера-Мизеса

$$\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} = \sigma_y^2, \quad (1.4)$$

где σ_y — предел текучести материала заготовки при одноосном растяжении.

Поверхность нагружения представляет собой равномерно расширяющуюся поверхность (1.4) Губера-Мизеса изотропного упрочнения материала

$$f \equiv 3J_2^s - \sigma_y^2, \quad (1.5)$$



где $J_2^* = s_{ij}s_{ij} / 2$ – второй инвариант девиатора, σ_{y^*} – текущее значение предела текучести в точке нагружения.

Если $f < 0$ или $f = 0$, $\frac{\partial f}{\partial \sigma_M} d\sigma_M \leq 0$, то $d\varepsilon_{ij}^p = 0$.

Если $f = 0$, $\frac{\partial f}{\partial \sigma_M} d\sigma_M > 0$ то приращения пластической деформации

$$d\varepsilon_{ij}^p = s_{ij} h(J_2^*) dJ_2^*, \quad (1.6)$$

где функция

$$h(J_2^*) = \frac{1}{2\sqrt{6}J_2^*} \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{\mu} \right), \quad \left(\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \right). \quad (1.7)$$

В (1.7) E_t – касательный модуль к пластической диаграмме одноосного растяжения образца материала заготовки. Для рассматриваемых в этой работе материалов E_t является постоянной величиной и характеризует интенсивность линейного упрочнения.

Приращения деформации ползучести

$$d\varepsilon_{ij}^c = \dot{\varepsilon}_{ij}^c dt, \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{\partial \Phi}{\partial s_{ij}}, \quad (1.8)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$ – скорость деформаций ползучести, t – время, $\Phi(\sigma_{cl}, \xi, \eta)$ – потенциал скоростей ползучести для материала заготовки, который в условиях ползучести является трансверсально-изотропным с плоскостью изотропии x_1, x_2 и с неодинаковыми характеристиками на растяжение и сжатие [4-6]:

$$\Phi = \frac{f_1(\xi, \eta)}{n_1 + 1} \sigma_{cl}^{n_1 + 1} + \frac{f_2(\xi, \eta)}{n_2 + 1} \sigma_{c2}^{n_2 + 1}, \quad (1.9)$$

В правой части (1.9)

$$\sigma_{cm} = \sqrt{\frac{3}{2} T_m}, \quad T_m = a_m J_1^2 + b_m J_2 + c_m J_3, \quad (m=1,2), \quad (1.10)$$

$(a_m > 0, b_m > 0, c_m > 0).$

$$\xi = \frac{J_1}{\sqrt{J}}, \quad \eta = \sqrt{\frac{J_3}{J}}, \quad (J = J_1^2 + J_2 + J_3). \quad (1.11)$$

$$J_1 = \sigma_{33} - \frac{1}{2}(\sigma_{11} + \sigma_{22}), \quad J_2 = (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2, \quad (1.12)$$

$$J_3 = \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2.$$

$$f_1(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^3 \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^6 \frac{\vec{r}_l \cdot \vec{r}_k}{r_k \cdot r_l}, \quad f_2(\xi, \eta) = \sum_{k=4}^6 \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^6 \frac{\vec{r}_l \cdot \vec{r}_k}{r_k \cdot r_l}. \quad (1.13)$$

$$\vec{r}_l = (\xi - \xi_l) \vec{e}_1 + (\eta - \eta_l) \vec{e}_2, \quad \vec{r}_k = (\xi_k - \xi_l) \vec{e}_1 + (\eta_k - \eta_l) \vec{e}_2, \quad \vec{e}_\alpha \cdot \vec{e}_\beta = \delta_{\alpha\beta}.$$

Параметры ξ и η в (1.11) идентифицируют тип напряженного состояния, $|\xi| \leq 1, 0 \leq \eta \leq 1$. Постоянные a_m, b_m, c_m определяются характеристиками кри-

вых ползучести, полученных при соответствующих фиксированных типах напряженного состояния (ξ, η) и температуре T образцов материала заготовки, вырезанных в данных направлениях:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2}{3} \left(\frac{3}{2} B_{13} \right)^{\frac{2}{n_1-1}}, \quad b_1 = \frac{2}{3} \left(\frac{3}{2} B_{11} \right)^{\frac{2}{n_1-1}} - \frac{a_1}{4}, \\ c_1 &= \frac{8}{3} \left(\frac{3}{2} B_{1x} \right)^{\frac{2}{n_1-1}} - \frac{a_1}{4} - b_1, \\ a_2 &= \frac{2}{3} \left(\frac{3}{2} B_{23} \right)^{\frac{2}{n_2-1}}, \quad b_2 = \frac{2}{3} \left(\frac{3}{2} B_{21} \right)^{\frac{2}{n_2-1}} - \frac{a_2}{4}, \\ c_2 &= \frac{8}{3} \left(\frac{3}{2} B_{2x} \right)^{\frac{2}{n_2-1}} - \frac{a_2}{4} - b_2. \end{aligned} \quad (1.14)$$

где B_{i2}, B_{i1}, B_{ix} и n_i – соответственно коэффициент и показатель степенной зависимости скорости установившейся ползучести от напряжения при чистом растяжении ($m=1$) и чистом сжатии ($m=2$) призматических образцов, вырезанных в заготовке вдоль осей x_3, x_1 , или x_2 , и в плоскости x_2, x_3 под углом $\pi/4$ к оси x_3 .

Общий (не ассоциированный) закон течения установившейся ползучести материала заготовки при эквивалентном напряжении $f_1 \sigma_{cl} + f_2 \sigma_{c2}$ записывается следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = [f_1(\xi, \eta, \zeta) \sigma_{cl}^{n_1-1} + f_2(\xi, \eta, \zeta) \sigma_{c2}^{n_2-1}] s_{ij}. \quad (1.15)$$

2. Постановка задач

Рассматриваемый процесс формообразования панели состоит из двух стадий: активной, на которой происходит упругое и необратимое деформирование заготовки искомыми силами или перемещениями, и пассивной – упругой разгрузки. Начальное напряженно-деформированное состояние пассивной стадии является конечным состоянием активной стадии. При разгрузке заготовка свободна от внешних воздействий, её весомость не учитывается. Предполагаем, что при разгрузке происходит чисто упругое деформирование, приращения неупругих деформаций отсутствуют. Закрепление заготовки при формообразовании панели исключает её перемещение как абсолютно твердого тела.

Согласно рассматриваемым материалам и технологическим условиям [7], для моделирования формообразования данных крыльевых панелей используем следующие уравнения [8, 9]:

2.1. Уравнения механики квазистатически деформируемой заготовки в предположении малости деформаций, поворотов и перемещений (MNO – Material Nonlinear Only формулировка).

2.1.1. Определяющие уравнения (1.2), (1.6), (1.7), (1.8), (1.9), (1.15) зависимости деформаций от напряжений, которые записываются уравнением связи скоростей напряжений и деформаций в виде

$$\dot{\sigma} = C : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^c), \quad (2.1)$$

где $\dot{\sigma} = (\dot{\sigma}_{ij})$ и $\dot{\epsilon} = (\dot{\epsilon}_{ij})$ — соответственно, скорости симметричных тензоров напряжений и деформаций Коши, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p + \dot{\epsilon}^c$, $\dot{\epsilon}^c$ определяется согласно второму соотношению (1.8) или (1.15); $C = (C_{ijkl})$,

$$C_{ijkl} = \frac{E}{1+\nu} \left[\frac{1}{2} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + \frac{1}{1-2\nu} \delta_{ij}\delta_{kl} - c \frac{s_{ij}s_{kl}}{1+\nu+2\alpha(J_2^s)} \right],$$

$$c = \begin{cases} 0, & \text{если } f_y < 0 \text{ или } f_y = 0 \text{ и } s_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} < 0 \\ 1, & \text{если } f_y = 0 \text{ и } s_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} > 0 \end{cases},$$

$$\alpha(J_2^s) \equiv \frac{3}{4J_2^s} \left[\frac{E}{E_t} - 1 \right].$$

Знак «:» между тензорами обозначает операцию их двойного внутреннего произведения (свертки по двум индексам).

2.1.2. Уравнения равновесия (в слабой форме)

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_V \rho f \cdot \delta u dV + \int_{S_T} \tilde{T} \cdot \delta u dS, \\ \forall \delta u (\delta u \equiv \delta \tilde{u} = 0 \text{ на } S_u). \quad (2.2)$$

Здесь и далее: $u = (u_i)$ — вектор перемещений, $\tilde{T} = (\tilde{T}_i)$, $\tilde{T} = N \cdot \sigma = \sigma \cdot N$ — вектор поверхностных сил, N — единичный вектор внешней нормали к поверхности S_T ; ρ — массовая плотность материала заготовки; V — область, занимаемая заготовкой, S — поверхность заготовки; S_u , S_T — части поверхности $S = S_u \cup S_T$ ($S_u \cap S_T = \emptyset$); точка между тензорами и/или векторами обозначает операцию их внутреннего произведения (свертки по одному индексу); знак « δ » обозначает вариацию, так что $\delta u = 0$ на S_u .

На активной стадии формообразования заготовка на S_T может подвергаться действию поверхностных сил \tilde{T} :

$$N \cdot \sigma = \tilde{T} \text{ на } S_T. \quad (2.3)$$

Поверхность заготовки S_u перемещается согласно закреплению и искомому граничному полю вектора перемещений \tilde{u} :

$$u = \tilde{u} \text{ на } S_u. \quad (2.5)$$

2.1.3. Уравнения связи между тензором полных деформаций и тензором градиента перемещений

$$\epsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^T), \quad (2.6)$$

где ∇u — тензор градиента перемещений (знак обозначает набла-вектор); здесь и далее индекс « T » обозначает операцию транспонирования.

2.2. Уравнения механики квазистатически деформируемой заготовки с учетом больших перемещений/поворотов при малых деформациях и с отсчетной конфигурацией, совпадающей с начальной конфигурацией заготовки в начальный момент времени $t = 0$ (TL — Total Lagrangian-формулировка).

2.2.1. В определяющих уравнениях (1.2), (1.6), (1.7), (1.8), (1.9), (1.15) зависимостей деформаций от напряжений при упругости, пластичности и ползучести пара тензоров (S, E) ; $S = (S_{ij})$, $E = (E_{ij})$ — соответственно, второй тензор напряжений Пиола — Кирхгофа, E — тензор деформаций Грина — Лагранжа. Тогда эти уравнения записываются уравнением связи скоростей напряжений и деформаций в виде

$$\dot{S} = C : (\dot{E} - \dot{E}^c), \quad (2.7)$$

где $\dot{S} = (\dot{S}_{ij})$ на $\dot{E} = (\dot{E}_{ij})$ — скорости тензоров S и E , $\dot{E} = \dot{E}^e + \dot{E}^p + \dot{E}^c$.

2.2.2. Уравнения равновесия (в слабой форме):

$$\int_V S : \delta E dV = \int_V \rho f \cdot \delta u dV + \int_{S_T} \tilde{T} \cdot \delta u dS, \\ \forall \delta u (\delta u \equiv \delta \tilde{u} = 0 \text{ на } S_u), \quad (2.8)$$

где V — область, занимаемая заготовкой в отсчетной конфигурации, ρ — массовая плотность материала заготовки в отсчетной конфигурации.

На активной стадии заготовка на S_T может подвергаться действию поверхностных сил \tilde{T} :

$$\tilde{T} \equiv N \cdot (S + S \cdot \nabla u) \text{ на } S_T. \quad (2.9)$$

Поверхность заготовки S_u перемещается согласно закреплению и полю вектора перемещений \tilde{u} :

$$u = \tilde{u} \text{ на } S_u. \quad (2.10)$$

2.2.3. Уравнения связи между тензором полных деформаций и тензором градиента перемещений:

$$E = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^T + \nabla u \cdot \nabla u^T). \quad (2.11)$$

В результате численного решения этой задачи должны находиться такие граничные поля, при которых модельное решение минимально отклоняется от заданной конфигурации панели в момент времени t' окончания процесса формообразования.

3. Методы и процедуры численных решений задач формообразования

Приведенные в п. 2 слабые формы уравнений являются основой применения МКЭ к решению задач.

Интегрирование уравнений задач, представленных в п. 2.1 и п. 2.2, осуществляется пошагово. Для применения шаговой процедуры интегрирования по времени требуется из уравнений, представленных в п. 2.1 и п. 2.2, получить уравнения квазистатического деформирования твердых тел, записанные в приращениях. Считая шаг по времени Δt достаточно малым и следуя [8] в рамках МНО-формулировки уравнений, получаем линеаризованное уравнение равновесия (в слабой форме), записанное в приращениях:

$$\int_V \delta \epsilon : {}^t C : \Delta \epsilon dV = \int_V \rho^{t+\Delta t} f \cdot \delta u dV + \int_{S_r} {}^{t+\Delta t} T^* \cdot \delta u dS - \int_V ({}^t \sigma + {}^t \phi \Delta t) : \delta \epsilon dV \quad \forall \delta u (\delta u = 0 \text{ на } S_u), \quad (1)$$

где $\phi = -C : \dot{\epsilon}^c$; $\dot{\epsilon}^c$ определяется согласно второму соотношению (1.8) или (1.15).

В (3.1) и далее левый верхний индекс у некоторой величины указывает тот момент времени, в который она рассматривается; знак δ перед величиной означает ее приращение с момента времени t к моменту времени $t + \Delta t$.

Линеаризованное уравнение равновесия в приращениях, записанное в слабой форме, для TL-формулировки уравнений $\forall \delta u (\delta u = 0 \text{ на } S_u)$:

$$\int_V \delta E : {}^t C : E dV + \int_V {}^t S : \delta [\nabla \hat{u} \cdot \nabla \hat{u}^T] dV = \int_V \rho^{t+\Delta t} f \times \delta \hat{u} dV + \int_{S_r} {}^{t+\Delta t} \hat{T} \cdot \delta \hat{u} dS - \int_V ({}^t S + {}^t \Phi \Delta t) : \delta E dV. \quad (3.2)$$

где $\Phi = -C : \dot{E}^c$; \dot{E}^c определяется, после замены $\dot{\epsilon}$ на \dot{E}^c , согласно второму соотношению (1.8) или (1.15).

В (3.2)

$$\hat{u} \equiv \Delta u, \quad e \equiv \frac{1}{2} (\nabla \hat{u} + \nabla \hat{u}^T + \nabla^t u \cdot \nabla \hat{u}^T + \nabla \hat{u} \cdot \nabla^t u^T). \quad (3.3)$$

Дискретный аналог скалярных уравнений (3.1) и (3.2) получим, используя МКЭ. В обоих случаях приходим к уравнению вида [8]

$$\delta U^T {}^t K \Delta U = \delta U^T ({}^{t+\Delta t} R - {}^t F), \quad \forall \delta U \in R^{N_w}. \quad (3.4)$$

Здесь ΔU – вектор приращений узловых перемещений; ${}^{t+\Delta t} R$ и ${}^t F$ – векторы внешних и внутренних сил, определенные в моменты времени $t + \Delta t$ и t соответственно; K – симметричная касательная матрица жесткости, определенная в момент времени t ; N_w – число независимых степеней свободы.

В силу произвольности вектора δU скалярное уравнение (3.4) эквивалентно векторному уравнению

$${}^t K \Delta U = {}^{t+\Delta t} R - {}^t F. \quad (3.5)$$

После определения из системы линейных уравнений (4.2) вектора приращений узловых перемещений ΔU решение ${}^{t+\Delta t} U$ для вектора узловых перемещений в момент времени $t + \Delta t$ определяется по формуле

$${}^{t+\Delta t} U = {}^t U + \Delta U.$$

Это решение уточняется методом Ньютона-Рафсона до тех пор, пока вектор невязки на i -ой итерации ${}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} F^{(i)}$ не станет близким к нулевому вектору (в смысле евклидовой нормы) в пределах заданной относительной погрешности решения.

4. Проектирование развёрток-заготовок панелей

Для расчета процессов изготовления данная геометрическая модель детали является конечным результатом, а исходной является, как обычно, плоская фрезерованная с одной стороны заготовка с внутренней гравюрой. Но сама заготовка, ее размеры и гравюра в горизонтальном состоянии нам неизвестны. Существующие методы и программные решения определения конфигураций заготовок-разверток панели, как правило, используют только геометрические данные детали, что для данных панелей недостаточно и приводит к недопустимо большим размерным погрешностям.

При использовании системы РТПИРСЭМ эти погрешности можно значительно уменьшить за счет учета влияния необратимых деформаций при штамповке. Например, полученная в РТПИРСЭМ развертка детали из сплава АК4-1Т двойной знакопеременной кривизны типа «седло» в пять раз меньше по сравнению с решением задачи о развертке этой же детали в соответствующем модуле программы Unigraphics-NX4 [2].

Рассмотрим в качестве примера результат проектирования в РТПИРСЭМ развертки UG-модели панели из сплава В95 ОЧК самолета SSJ-100, формируемой при повышенных температурах в релаксационном режиме при термофиксации (рис. 2) [2].

Из рис. 2 видно характерное отличие разверток деталей двойной знакопеременной несимметричной кривизны от разверток деталей одинарной кривизны. А именно, прямые граничные участки детали разворачиваются в линию, имеющую кривизну. Для данной панели максимальная стрела вогнутости по стрингеру достигает 14 мм. Этот факт учитывается при изготовлении фрезерованных заготовок панелей. Заметим, что, как показывают расчеты, сформованная из такой заготовки деталь уже не будет иметь указанной вогнутости. В процессе формообразования эта вогнутость постепенно ликвидируется, переходя в выпуклость в конце прижатия к рабочему

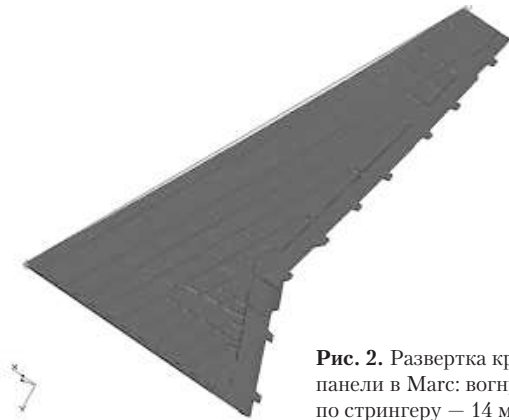


Рис. 2. Развертка крыльевой панели в Mag: вогнутость по стрингеру — 14 мм

контуру формообразующей оснастки; после разгрузки стрингер становится прямым, как и в теории.

На рис. 3 представлена также созданная в системе РТПРСЭМ электронная модель развертки панели из сплава 1163, формуемой «холодной» гибкой сплошным цельным пуансоном,

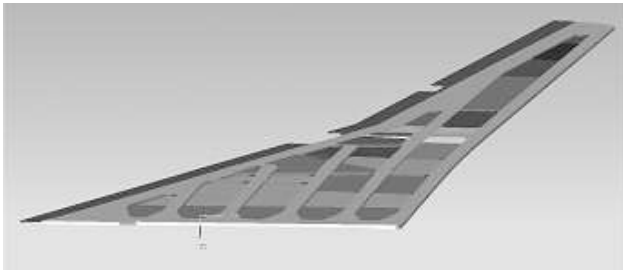


Рис. 3. Развертка крыльевой панели в UG

В проектах разверток панелей подпрограммой РСЭМ также выделяются плоские, гладкие, цилиндрические и развертывающиеся участки поверхности гравюры. Это позволяет значительно повысить эффективность создания, например, в модуле САМ UG, и оптимизации САМ-программ фрезерования заготовок панелей на станках с ЧПУ.

5. Моделирование и отработка процессов формообразования

В системе РТПРСЭМ трехмерный анализ напряжений проводится на всех этапах и при всех режимах формообразования. Например, на этапах прижатия «холодной» заготовки к рассчитываемому рабочему контуру штамповой оснастки, во время эволюции напряжений во времени в период релаксации напряжений при ползучести в условиях повышенной температуры в заневоленном состоянии, при освобождении заготовки из оснастки. Так, было установлено, что наиболее опасное состояние заготовки с точки зрения прочности возникает в момент окончательного прижатия к рабочим контурам оснастки перед началом разогрева. На рис. 4 представлено распределение интенсивности напряжений в

заготовке в заневоленном состоянии в этот момент. Из распределения напряжений видно, что напряжения в области «носика» панели превышают предел прочности сплава, что может привести к образованию трещин и к браку панели. Анализ компонент тензора напряжений в этой опасной области панели позволил также определить, что запас прочности сплава исчерпывается при достижении радиуса кривизны носика, равной 200 мм. Поэтому первое пробное решение, направленное на недопущение брака, обнаруженного при моделировании, была рекомендация уменьшить кривизну этого участка расчетного рабочего контура оснастки, ограничиваясь его радиусом кривизны меньшей 200 мм, а довести его до теоретического значения последующей свободной гибкой после охлаждения заготовки. Однако проверка этого решения показала его неэффективность. Рассчитанный новый рабочий контур оснастки по сравнению с исходной кривизной значительно изменился. Вследствие максимальных напряжений на «носике» в результате распруживания при освобождении панели происходил выгиб стрингера с отклонением от теории до 2 мм. Доводка носика снова приводила к появлению трещин и к браку всей панели. Таким образом, была установлена нетехнологичность данной конструкции панели.

На основании данных результатов в конструкцию панели были внесены изменения, а именно, наиболее напряженный участок носика (этот участок выделен светлее на рис. 5) отделить от панели, формообразовать его отдельно путем фрезерования и далее присоединить к панели.

Отметим существенное положительное качество формообразования при ползучести в режиме термофиксации, которое заключается в увеличении остаточного прогиба при одновременном уменьшении (релаксации) напряжений. После формообразования перед охлаждением заготовки расчеты показывают по сравнению с полем (рис. 4) снижение максимальных напряжений в 2.7 раза. Это обеспечивает

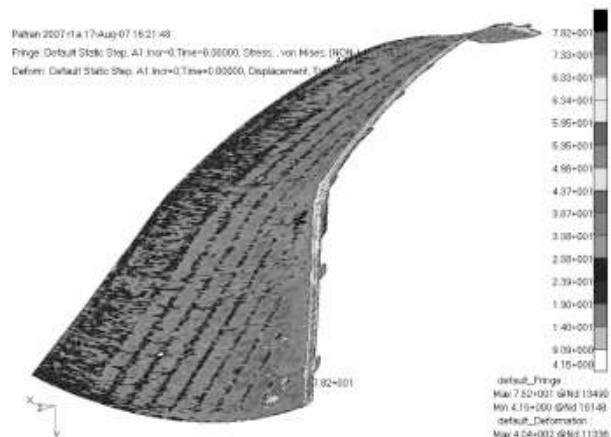


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений в заготовке в заневоленном состоянии перед разогревом

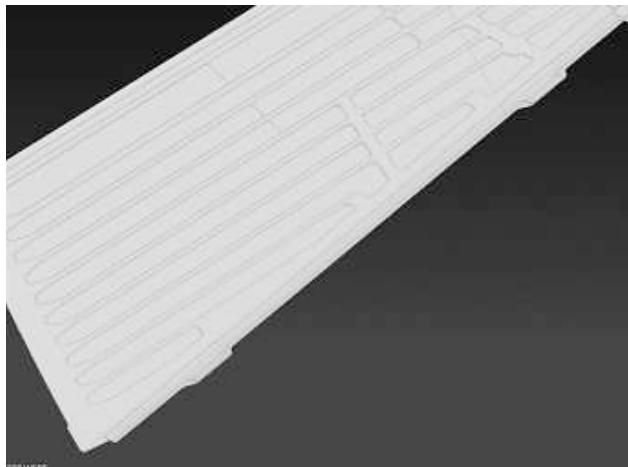


Рис. 5. Коренной край развертки панели с отделяемым участком «носки» (светлее)

допустимый уровень остаточных напряжений в готовой детали.

6. Опытно-промышленные испытания

Монолитные крупногабаритные панельные конструкции создаются совместными усилиями конструкторов, изготовителей и испытателей. Одну из главных задач при проектировании процессов изготовления панелей сложной кривизны и гравюры представляет собой объединение в единое целое требований к конструкции, условий производства и испытаний.

В данном разделе приведены результаты опытно-промышленных испытаний разработанной системы РТПИРСЭМ.

Испытания проводились соответствующими отделами и производственными цехами ОАО «КнААПО». Предметом испытаний были полученные в системе РТПИРСЭМ, исходя из UG-файла панели и экспериментальных диаграмм деформирования, UG-развертки панели, температурно-скоростных параметров штамповки, UG-поверхности ложементов штамповой оснастки и запаса прочности заготовки. Все эти данные были рассчитаны для технологии гибки в режиме релаксации при термофиксации. Данная панель являлась верхней панелью отъемной части крыла опытного экземпляра самолета Sukhoi SuperJet-100 (SSJ-100).

На рис. 6 представлена заготовка, отфрезерованная, исходя из рассчитанной в РТПИРСЭМ UG-развертки панели.

По данным системы РТПИРСЭМ был разработан проект оснастки (формблока) и подготовлены программы для фрезерования её элементов, по которым был изготовлен и смонтирован формблок (рис. 7).

Согласно расчетным температурно-скоростным параметрам, в этом формблоке была заневолена фрезерованная панель и помещена в специальную печь-камеру.

Нагревание заготовки и оснастки в печи осуществлялось не более, чем до температуры 150 °С. Реализованный режим нагрева и охлаждения, а также однородность температуры заготовки контролировалась термопарами. На рис. 8 представлена температурно-временная кривая нагрева и охлаждения заготовки.

После охлаждения опытная панель была извлечена из форм-блока и помещена на контрольный стапель для составления протокола обмера.

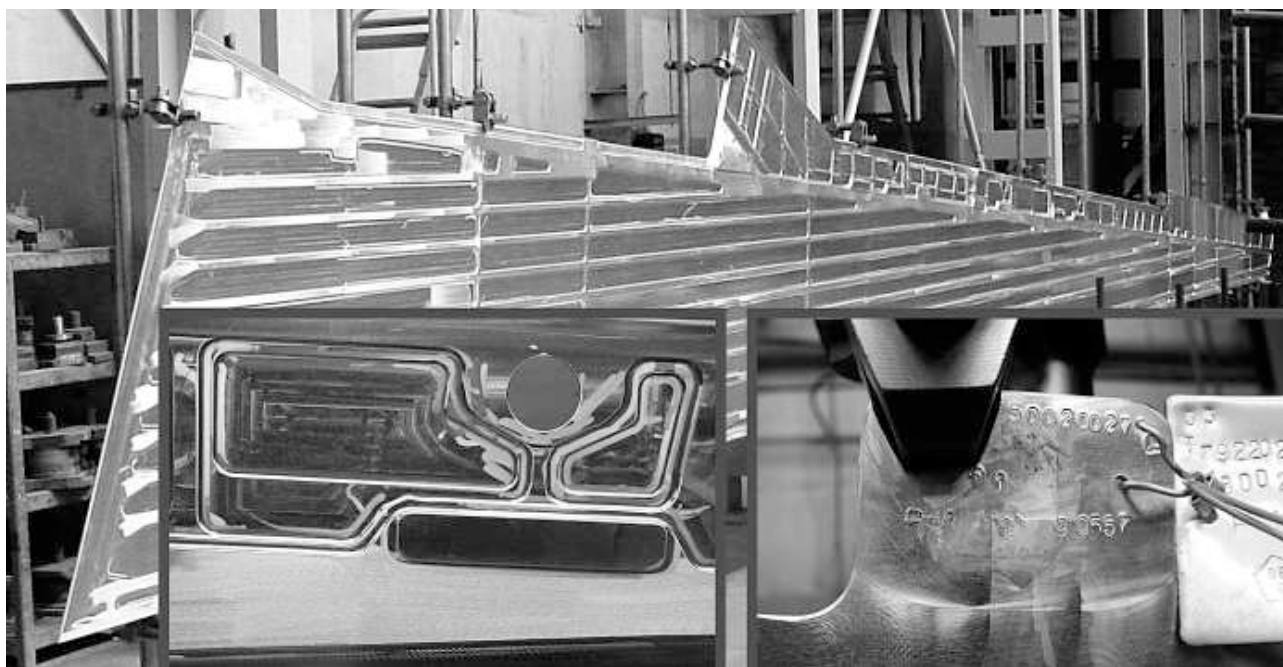


Рис. 6. Фрезерованная заготовка панели

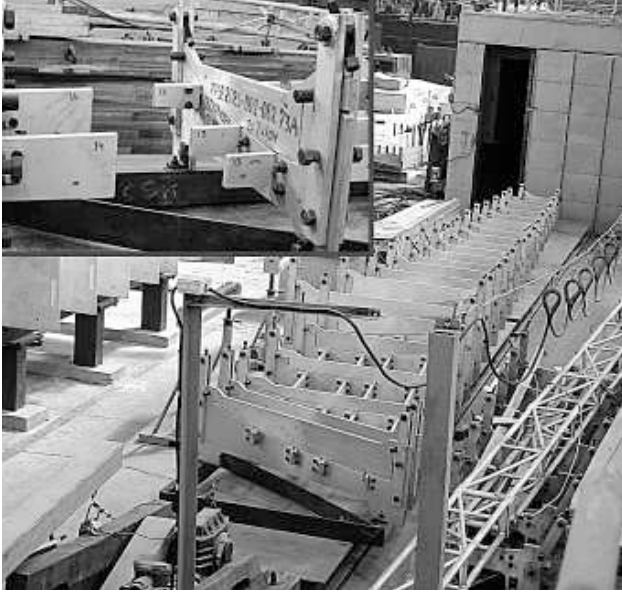


Рис. 7. Штамповая оснастка для формообразования опытной панели — формблок

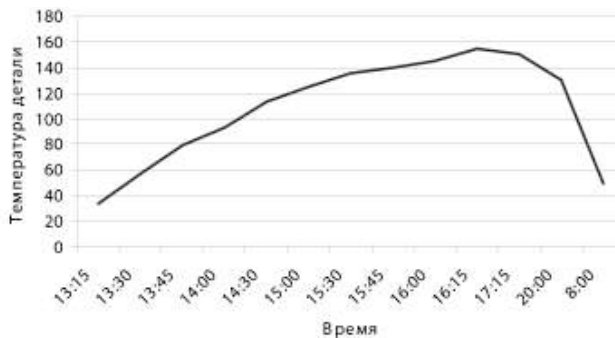


Рис. 8. Изменение температуры заневоленной заготовки панели

7. Основные выводы

Контроль качества изготовления опытной панели показал отсутствие браковочных признаков, связанных, например, с превышением размерных допусков, появлением микротрещин, гофрированием, утонением или ростом зерен сплава.

В протоколе обмера изготовленной панели на контрольном стапеле и в заключении комиссии приемочного контроля отмечена высокая сходимость результатов расчета и опытно-промышленных испытаний и утверждены следующие главные выводы.

1. Изготовленная панель соответствует теоретическому макету с устранимыми отклонениями.
2. Описанное состояние панели достигнуто после первого натурального эксперимента.

На основании результатов данных опытно-промышленных испытаний можно сделать вывод об эффективности предлагаемых системой РТПИРСЭМ проектно-технологических решений. Ожидаемый минимальный экономический эффект приме-

нение системы РТПИРСЭМ при подготовке производства одной данной панели оценивается примерно в 2,2 миллиона рублей.

Литература

1. Олейников А.И. Моделирование процессов формообразования панелей российского регионального самолета // IX Всероссийский съезд по теорет. и прикл. механике: Аннотации докладов. Н. Новгород, 22–28 августа 2006 г. Н. Новгород: НГУ, 2006. Т. 3: С. 162.

2. Олейников А.И., Пекарш А.И. Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей. М.: Эком, 2009. 112 с.

3. Горев Б.В., Масанов И.Ж., Пекарш А.И., Олейников А.И. Особенности деформационно-прочностного поведения листовых материалов на основе алюминия применительно к формообразованию деталей в режиме ползучести // Матер. XI межд. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». М.: Изд-во МАИ, 2005. Т. 1. С. 115–117.

4. Олейников А.И. Модели установившейся ползучести для изотропных и трансверсально-изотропных материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии / Успехи механики сплошных сред. Тезисы Всероссийской конференции, приуроченной к 70-летию академика В.А. Левина, Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 98.

5. Олейников А.И., Бормотин К.С. Модели установившейся ползучести в проектировании процессов изготовления элементов конструкций / Успехи механики сплошных сред: к 70-летию академика В.А. Левина: сб. науч. тр. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 571–582.

6. Олейников А.И. Модели установившейся ползучести трансверсально-изотропных материалов с разными характеристиками при растяжении и сжатии // СибЖИМ. 2010. (в печати).

7. Олейников А.И., Пекарш А.И., Бакаев В.В., Сарыков С.Э., Долгополик О.Д. Подготовка производства сложных деталей двойной знакопеременной кривизны методом конечно-элементного анализа геометрической модели с комплексной разработкой формообразующей оснастки, развертки детали и рекомендаций по технологическому процессу // САПР и графика, 2009, № 2, С. 88–96.

8. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. 262 с.

9. Олейников А.И., Коробейников С.Н., Горев Б.В., Бормотин К.С. Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 346–365.