

УДК 539.374, 624.078.44
MSC2010 74C15

© А. И. Олейников, К. С. Бормотин¹

Моделирование процесса клепки панели

Проводится моделирование процесса высокоресурсного заклепочного соединения элемента панели двойной кривизны с ребрами жесткости. Анализируется влияние маршрута клепки на торцевые перемещения элемента обшивки.

Ключевые слова: *клепка, маршрут клепки, остаточное напряженно-деформированное состояние.*

Введение

При изготовлении обшивок по способу высокоресурсного заклепочного соединения панели и стрингеров (ребер жесткости) наблюдаются существенные отклонения фактических и заданных геометрических параметров обшивки. Причем эти отклонения зависят от маршрута клепки. Поэтому можно попытаться снизить эти отклонения путем выбора эффективного маршрута клепки. Для определения этого маршрута необходимо выполнить моделирование процесса клепки при разных маршрутах клепки. В этой статье анализ влияния маршрута клепки на геометрию обшивки проводится с помощью численного моделирования процесса высокоресурсного заклепочного соединения элемента панели двойной кривизны с ребрами жесткости.

1. Уравнения деформирования тел из упругопластического материала

В процессе образования высокоресурсного заклепочного соединения происходит одновременная осадка замыкающей и закладной головок. Осадка головок клепки сопровождается интенсивным пластическим течением. Снятие усилий образует сложное распределение остаточных перемещений, деформаций и напряжений. В данной работе при моделировании процесса клепки учитываются большие деформации и условия контакта. Учет больших пластических деформаций требует рассматривать модифицированную формулировку Лагранжа (Updated Lagrangian –

¹Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. Электронная почта: cvmi@knastu.ru

UL), в которой в качестве отсчетной конфигурации берется текущая и используются истинные тензоры напряжений Коши и логарифмические тензоры деформаций Генки.

Вариационный принцип Хилла в текущей конфигурации формулируется в виде [1]:

$$\delta I = 0, \quad (1)$$

где функционал

$$I(\mathbf{v}) \equiv \int_V [W(\mathbf{d}) + \frac{1}{2} \mathbf{s} : (\nabla \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}^T)] dV - \int_{S_T} \mathbf{t}^* \cdot \mathbf{v} dS. \quad (2)$$

При учете выполнения граничных условий для скоростей $\mathbf{v} = \mathbf{v}^*$ на S_u и определяющих соотношений между производной Трусделла от тензора напряжений Коши \mathbf{s}

$$\mathbf{s}^{Tr} = \mathbf{s} - \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{s} \cdot \mathbf{l} + \mathbf{s} \mathbf{t} \mathbf{r} \mathbf{d},$$

(где \mathbf{l} называется тензором градиента скорости, \mathbf{l} — транспонированным к нему тензором) и тензора скорости деформаций $\mathbf{d} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)$

$$\mathbf{s}^{Tr} = \frac{dW(\mathbf{d})}{d\mathbf{d}} \quad \text{или} \quad \mathbf{s}^{Tr} = \mathbf{C} : \mathbf{d} \quad (3)$$

стационарное значение вариации функционала (2) приводит к уравнениям равновесия в V и граничным условиям на S

$$\nabla \cdot (\mathbf{s}^{Tr} + \mathbf{s} \cdot \nabla \mathbf{v}) = 0, \quad \dot{\mathbf{t}} \equiv \mathbf{n} \cdot (\mathbf{s}^{Tr} + \mathbf{s} \cdot \nabla \mathbf{v}) = \dot{\mathbf{t}}^*.$$

Инкрементальный аналог производной представляется в виде:

$${}^t s_{ij}^{Tr} = {}^t s_{ij} - {}^t s_{kj} u_{i,k} - {}^t s_{ik} u_{j,k} + {}^t s_{ij} u_{k,k}.$$

В UL-формулировке все величины рассматриваются по отношению к некоторому моменту времени t , для которого напряженно-деформированное состояние предполагается известным. Т.е. ${}^t S_{ij} = {}^t s_{ij}$, ${}^t S_{ij}$ — компоненты второго тензора напряжений Пиола – Кирхгофа в момент времени t , в качестве отсчетной предполагается конфигурация в момент времени t . ${}^t s_{ij}$ — компоненты тензора напряжений Коши в момент времени t (отсчетной является конфигурация в тот же момент времени t). Компоненты тензора скорости деформаций записываются в виде

$$d_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad v_{i,j} = \frac{\partial v_i}{\partial t x_j}.$$

Компоненты линеаризованной части приращений деформаций имеют вид

$${}^t e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad u_i = {}^{t+\Delta t} u_i - {}^t u_i.$$

Так как компоненты ${}^t e_{ij}$ являются инкрементальным аналогом компонент тензора скоростей деформаций d_{ij} , то

$${}^t e_{ij} \approx d_{ij} \Delta t.$$

При решении упругопластических задач методом последовательных приближений определяются аналоги инкрементальных компонент производной Труделла от тензора напряжений Коши \mathbf{s} и тензора скорости деформаций.

Для определения матрицы ${}^t\mathbf{K}$ и вектора \mathbf{R} в системе алгебраических уравнений ${}^t\mathbf{K}\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{R}$ и решения этой системы используется пакет MSC.Marc. Касательный модуль в определяющих соотношениях берется по кривой одноосного деформирования, построенной в осях «логарифмическая деформация» — истинное напряжение.

2. Моделирование клепки с натягом образцов-свидетелей

Образцы-свидетели задаются со следующими геометрическими параметрами: длина и ширина — 60 мм, а высота — 5 мм. Заклепка задается высотой 15 мм, диаметром 6 мм. Между образцами и заклепкой определяется контакт без трения.

Материал образцов — В95пчТ2, его механические характеристики таковы: модуль Юнга $E = 6027 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $\mu = 0.3$, предел текучести $\sigma_T = 43 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, модуль линейного упрочнения $E_T = 282.4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, которые определяются по диаграмме деформирования.

Механические характеристики сплава В65 заклепки задаются следующими параметрами: модуль Юнга $E = 7239.9 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, $\mu = 0.3$, предел текучести $\sigma_T = 20.4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, начальный модуль линейного упрочнения $E_{T1} = 113.3 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$, второй при $\varepsilon^p = 0.3$ $E_{T2} = 6.8 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$.

Решение проводится в два этапа: 1 – нагружение: приложение давления к торцу заклепки, 2 – разгрузка, уменьшение давления до нуля.

Для оценки получаемого при данном усилии радиального натяга анализировалось поле радиальных остаточных перемещений у заклепки, из которого определялся фактический радиальный натяг по формуле $\Delta_H = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\% \approx 1.8\%$. Полученная оценка натяга укладывается в назначенный допуск $\Delta_H = 2.2 \pm 0.5\%$. Таким образом, торцевое усилие для данного натяга составляет $177 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$. Найденное усилие используем при моделировании маршрута клепки.

3. Влияние маршрута клепки на остаточное напряженно-деформированное состояние панели

Для моделирования процесса клепки по заданному маршруту рассмотрен элемент обшивки, представленный на рис. 1.

Узкие верхние пластины (стрингеры или ребра жесткости) (рис. 1) имеют параметры: 75x20x5 мм. Третья пластина (элемент панели) имеет следующие параметры: 75x240x5 мм. В расчетах используется заклепка высотой 15 мм и диаметром 6 мм. Рассмотрены три варианта маршрута клепки: (1) 123456; (2) 654321; (3) 135246.

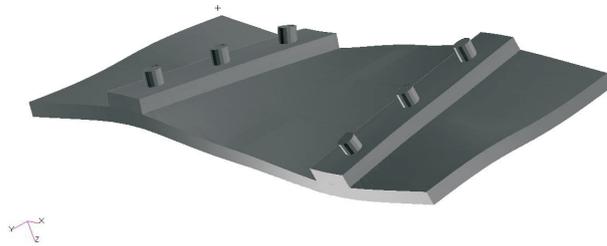


Рис. 1. Элемент обшивки.

Условия закрепления панели при моделировании заданы следующие: левый торец панели жестко закреплен, исключены перемещения панели по координате z .

На рис. 2 представлено распределение интенсивности остаточных касательных напряжений на поверхности панели для маршрута 1.

Ниже представлены графики распределения остаточных перемещений узлов в разных направлениях вдоль незакрепленной (правой) стороны панели (рис. 3, 4, 5).

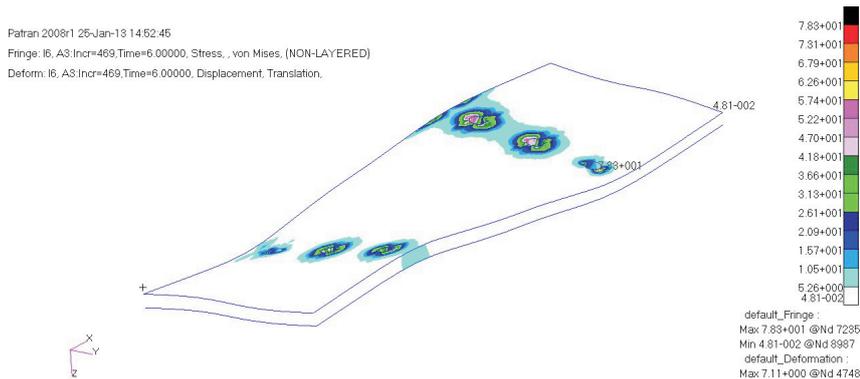


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние третьей пластины для маршрута 1.

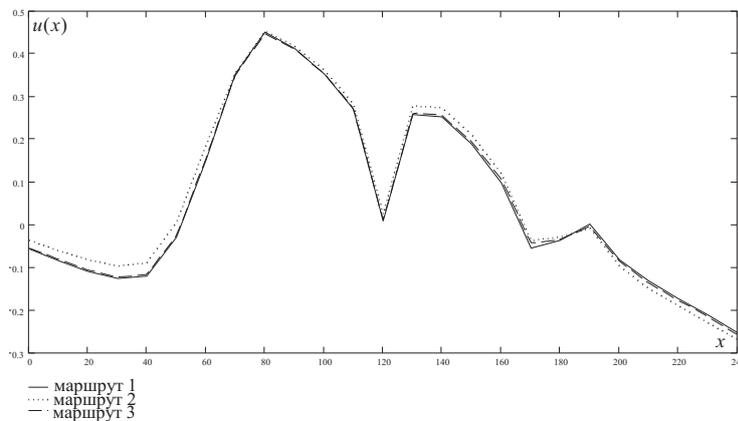
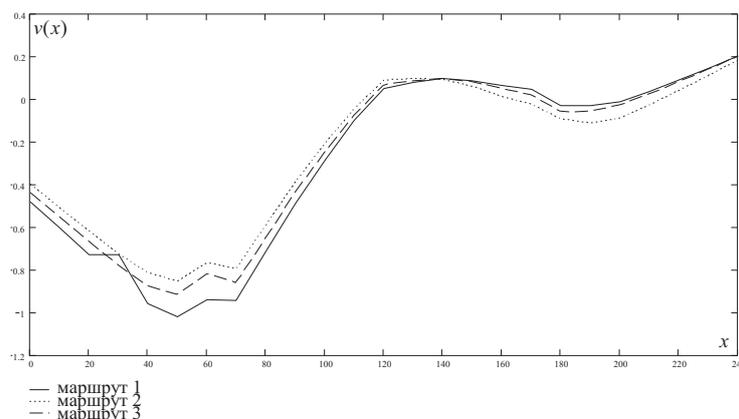
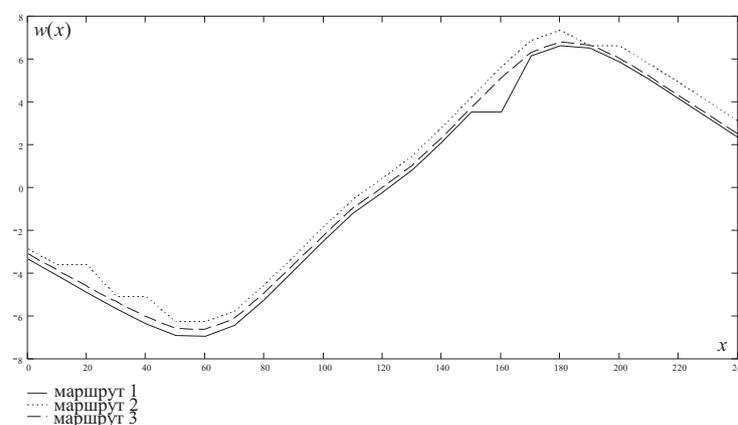


Рис. 3. График перемещений узлов вдоль направления оси x

Из анализа результатов данного расчета следует необходимость учета маршрута в процессе клепки с целью уменьшения отклонения при клепочной сборке обшивок.

Рис.4. График перемещений узлов вдоль направления оси y Рис.5. График перемещений узлов вдоль направления оси z

Список литературы

- [1] С. Н. Коробейников, *Нелинейное деформирование твердых тел*, СО РАН, Новосибирск, 2000.

Представлено в Дальневосточный математический журнал 8 февраля 2013 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Минобрнауки РФ (проект 1.2582.2011)

Oleinikov A. I., Bormotin K. S. Modeling of the panel-riveting process. Far Eastern Mathematical Journal. 2013. V. 13. № 1. P. 102–106.

ABSTRACT

The modeling of the process of high-resource riveting joint of the double-curvature panel with rib-stiffeners is done. The influence of riveting route on the face displacement of a covering element is analyzed.

Key words: *riveting, route of riveting, residual stress-strain state.*