

УДК 629.7:621.7

ВИРТУАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА НА КЛАСТЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМОВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ И ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

М. А. Гузев¹, А. И. Олейников², К. С. Бормотин², С. В. Серый², А. И. Пекарш³

Рассматриваются вопросы высокопроизводительного вычислительного моделирования и виртуальной отработки новых технологических режимов формообразования крыльевых панелей и вычисления их технологических заготовок. Приводятся результаты использования конечно-элементных программ на кластерном суперкомпьютере МВС-1000 и на кластере из стандартных ПЭВМ. Используется разработанный алгоритм определения напряжений, учитывающий разнородность материала. Приведены результаты сравнения моделирования с данными лабораторных и натуральных экспериментов. Оценивается вычислительная эффективность кластеров из различного числа узлов. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 07-01-00747, 06-И-СО-01-002 и ИШ-9004.2006.1). Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПавТ-2007; <http://agora.guru.ru/pavt>).

Ключевые слова: вычислительные кластеры, метод конечных элементов, развертка, формовка, ползучесть, оснастка, проектирование крыльевых панелей.

1. Введение. К настоящему времени при внедрении и отработке новых технологических процессов, режимов, материалов и оборудования, при смене объекта производства и усложнении конструктивных форм, при разработке оптимальных управляющих программ все больший интерес вызывает высокоточное численное моделирование. Обычно конкретные рекомендации конструкторам и технологам разрабатывались на основе полумпирических математических моделей. Однако, как правило, установление их простых основных соотношений требовали накопления и анализа достаточно массивов экспериментальных и натуральных производственных данных. Это, в свою очередь, определяло значительные материальные затраты и сроки постановки изделий на серийное производство. В то же время современное машиностроение характеризуется все более возрастающей частотой сменяемости объектов производства, а также усложнением конструктивных форм и увеличением габаритных размеров деталей конструкций. В этой связи и вычислительное моделирование на обычных ЭВМ вскоре станет все более несоответствующим современным требованиям. Переход к технологии параллельного инжиниринга и CALS-технологии информационно-вычислительной поддержки жизненного цикла изделия резко ограничил временные рамки получения новых натуральных экспериментально-производственных данных, необходимых для построения адекватных эмпирических и упрощенных математических моделей. С другой стороны, этот переход потребовал априорной оценки прочностных, эксплуатационных и технологических характеристик разрабатываемого изделия. В таких условиях единственным решением является максимально полный анализ полноразмерных теоретических моделей этих характеристик. В результате новые решения все в большей мере становятся обусловленными возможностями численного анализа на высокопроизводительных вычислительных системах.

В настоящей работе рассматриваются проблемы параллельного конечно-элементного анализа процессов формообразования крыльевых панелей и вычисления геометрических моделей заготовок нового регионального самолета. При выполнении данной темы пришлось решить ряд новых задач вычислительной технологической пластичности и ползучести.

Ниже представлены результаты решения указанных задач на кластере из стандартных ПЭВМ и на МВС-1000/16, полученные согласно алгоритму, рассмотренному в [1].

2. Вычислительные кластеры.

¹ Президиум ДВО РАН, ул. Светланская, д. 50, 690014, г. Владивосток; e-mail: guzev@hq.febras.ru

² Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Институт компьютерного проектирования машиностроительных технологий и оборудования, ул. Ленина, 27, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре; e-mail: cvmi@knastu.ru

³ Авиационно-производственное объединение им. Ю.А. Гагарина, ул. Советская, 1, 681018, г. Комсомольск-на-Амуре; e-mail: cvmi@knastu.ru

2.1. Кластер на основе ПЭВМ и ОС MSC.Linux. Первоначально была решена задача подготовки кластера на базе ПЭВМ. Новизна задачи заключалась в том, что кластер надо было организовать на основе специализированной ОС MSC.Linux. Отработка вопроса производилась на двухузловом вычислительном кластере. Персональные ЭВМ имели следующие характеристики: процессор — Athlon Barton 2600 MHz, ОЗУ — 1 Гб, материнская плата на основе чипсета nVidia nForce 2 PRO, встроенная гигабитная сетевая карта — RTL8169s. В связи с тем, что операционная система MSC.Linux не поддерживает приведенную выше конфигурацию узлов на аппаратном уровне, было решено первоначально организовать кластер на базе виртуальных машин VMWare. Практическая реализация такой схемы показала, что при установке узлов MSC.Linux в режиме эмуляции (как виртуальных машин) под операционной MS Windows Server 2000/2003 неэффективно работает сетевой обмен при запуске вычислительной задачи на кластере. В связи с этим возникают большие временные издержки при обмене данными между узлами кластера, во время которых центральный процессор простаивает, что сводит на нет преимущества кластерного подхода. Таким образом, было выявлено, что узким местом в такой схеме является сеть (неэффективная ее работа в среде виртуальных машин VMWare). Кроме того, часть производительности теряется на эмуляцию — это особенно заметно при работе с дисковой подсистемой. Поэтому в свете выявленных проблем было решено отказаться от использования данного подхода к построению кластера. Для установки MSC.Linux непосредственно на каждом из узлов требовалось решить проблему аппаратной совместимости. Для этого следовало реализовать поддержку сетевой карты и чипсета материнской платы в MSC.Linux. Сетевую карту удалось подключить, используя имеющиеся драйверы для операционной системы Linux RedHat 7.3. Они были благополучно восприняты MSC.Linux. Задача поддержки чипсета материнской платы решена следующим образом: из Интернета была установлена последняя версия ядра Linux (2.4.29, версия января 2005 г.) взамен исходного ядра версии 2.4.16, так как в ней заложена аппаратная поддержка требуемого чипсета (nVidia nForce 2). После выполненных действий кластер стал работоспособным.

Построенный кластер протестирован на задаче о развертке детали типа “седло” (рис. 1). Расчет производился в системе MSC.Marc по лицензии EC 4681 от 01.09.2002 г. фирмы MSC.Software GMBH.

Для сравнения времени работы последовательного и параллельного алгоритмов были вычислены коэффициенты ускорения $S_m = \frac{T_1}{T_m}$ и эффективности $E_m = \frac{S_m}{m}$ (T_m — время параллельного алгоритма на кластере из m рабочих станций, равное времени счета и накладных расходов на подготовку и пересылку данных, T_1 — время выполнения последовательного алгоритма на одной машине). Полученные данные ($S_2 = 1.5$, $E_2 = 0.75$, $T_2 = 10020$ с, $T_1 = 6681$ с) свидетельствовали о перспективности увеличения вычислительных узлов данного кластера. Второе тестирование было проведено на задаче расчета напряженно-деформированного состояния режущего инструмента с износостойким покрытием разных толщин: 1, 3 и 6 мкм (табл. 1). Из табл. 1 видно, что возрастание эффективности кластера с увеличением размерности задачи быстро стабилизировалось.

Таблица 1

Число узлов	6 мкм			3 мкм			1 мкм		
	T_m , с	S_m	E_m	T_m , с	S_m	E_m	T_m , с	S_m	E_m
1	145	—	—	352	—	—	1474	—	—
2	114	1.27	0.64	262	1.34	0.67	1094	1.35	0.67

2.2. Кластер MBC-1000/16 с ОС MSC.Linux. Следующим кластером, на котором устанавливалась специализированная ОС MSC.Linux, был MBC-1000. В исходном состоянии он состоит из 16 узлов, каждый из которых обладает следующими характеристиками: процессор — Intel Pentium III 800 МГц, ОЗУ — 1000 Мб, жесткий диск — 40 Гб, сетевая карта — Fast Ethernet. При реализации параллельных вычислительных процессов необходима, вообще говоря, многократная передача данных от одной подзадачи к другой, причем в нашем случае производительность сетевой подсистемы по приоритету является главной. Однако в изначальном оснащении поставляется сетевая подсистема 100Mb Fast Ethernet. Таким образом, быстродействие передачи данных между центральным процессором и оперативной памятью узла значительно превышает скоростные характеристики систем межкомпьютерного взаимодействия. Кроме того, сильно сказывалось на изменении функционирования системы различие в быстродействии кеш-памяти процессоров и межузловых коммуникаций. Существует ряд аппаратных решений, позволяющих устранить в той или иной степени данную трудность: Myrinet, Virtual Interface Architecture (cLAN компании Gigaset — одна из первых коммерческих аппаратных реализаций), SCI (Scalable Coherent Interface), QsNet

(Quadrics Supercomputers World), Memory Channel (разработка Compaq Computer и Encore Computer Corp.), а также Gigabit Ethernet. Сравнительная эффективность этих решений широко известна (см., например, материалы лаборатории параллельных информационных технологий НИВЦ МГУ, рекомендации технической поддержки корпорации Intel, материалы компании Mupicom, Inc., материалы компании SCI Europe). Анализ быстродействия аппаратных реализаций этих технологий, латентности аппаратной части, а также их стоимости обусловил выбор Gigabit Ethernet. Данная топология обеспечивает достаточно производительный обмен данными при наименьшей стоимости. На каждый узел были установлены качественные гигабитные сетевые карты Intel EtherExpress1000. Скорости Gigabit Ethernet оказалось достаточно для решения вычислительных задач в программных продуктах фирмы MSC. Фирма MSC.Software в своих программных продуктах использует технологии MPI и PVM для управления процессами, а также односторонние коммуникации (Put/Get) и параллельные I/O. Оценка предполагаемой функциональности MPI для целей исследования производилась благодаря известным результатам [2], из которых видно, что оптимальной производительностью обладает кластер, состоящий из 4–6 узлов.

Таблица 2

Число узлов	6 мкм			3 мкм		
	T_m, c	S_m	E_m	T_m, c	S_m	E_m
1	22	—	—	38	—	—
2	19	1.16	0.58	35	1.09	0.54
3	17	1.29	0.43	34	1.12	0.37
4	16	1.36	0.34	32	1.19	0.30

В табл. 2 приведены результаты тестовых испытаний, полученные на кластерном суперкомпьютере MBC-1000 при решении задач расчета напряженно-деформированного состояния режущего инструмента с износостойким покрытием разных толщин (3 и 6 мкм). Эти же испытания проводились и на вышеуказанном кластере из ПЭВМ. Использовалось не более четырех узлов.

Из сравнения первых верхних строк табл. 1 и 2 видно значительное ускорение (более чем в шесть раз) расчета на MBC по сравнению с временем расчета на рассмотренном кластере из ПЭВМ. Однако коэффициент ускорения и эффективность распараллеливания меньше, примерно на 9–19 %. Кроме того, на реализованной в MBC-1000 ОС MSC.Linux были успешно установлены и протестированы программные продукты Patran, Marc и Mentat фирмы MSC. Применение аппаратного ускорения графики OpenGL под Linux повысило удобство и скорость работы в этих программных продуктах.

3. Моделирование процессов развертки и формообразования панелей.

3.1. Вычисление геометрической модели заготовки. Современное вычислительное моделирование должно органично включаться в рамки технологий параллельного инжиниринга и CALS-технологии информационно-вычислительной поддержки жизненного цикла изделия. При этом в качестве исходных данных выступает САД-модель готовой детали. Однако для процесса формовки данная геометрическая модель является конечным результатом, а исходной является плоская, фрезерованная с одной стороны заготовка со сложным внутренним рельефом.

Однако сама заготовка, ее размеры, переменная толщина и вырезы рельефа в горизонтальном состоянии нам неизвестна, т.е., в отличие от обычного случая, здесь исходная отсчетная конфигурация, которую занимало тело до того, как оно было подвергнуто деформации, не может быть, как обычно, просто указана: ее еще надо найти. Таким образом, возникает первый вопрос: как по геометрической модели детали найти геометрическую модель фрезерованной заготовки крыльевой панели, которая и задаст исходную конфигурацию? Вычисление исходной конфигурации для данных панелей двойной знакопеременной кривизны и сильно переменной толщины не может быть сведено к задаче чисто геометрической развертки. Специально проведенный натурный эксперимент показал, что такое решение приводит к несовпадению контрольных отверстий, превышающих допустимое более чем в сто раз, и является неприемлемым. Поэтому на практике для подобных деталей задача определения заготовки решается, окончательно, опытным путем.

Ниже предлагается решение данной задачи в рамках вычислительной механики деформируемого тела.

Разработанная методика [1] вычисления трехмерной геометрической модели заготовки по САД-модели панели тестировалась на задаче определения размеров детали двойной знакопеременной толщины типа

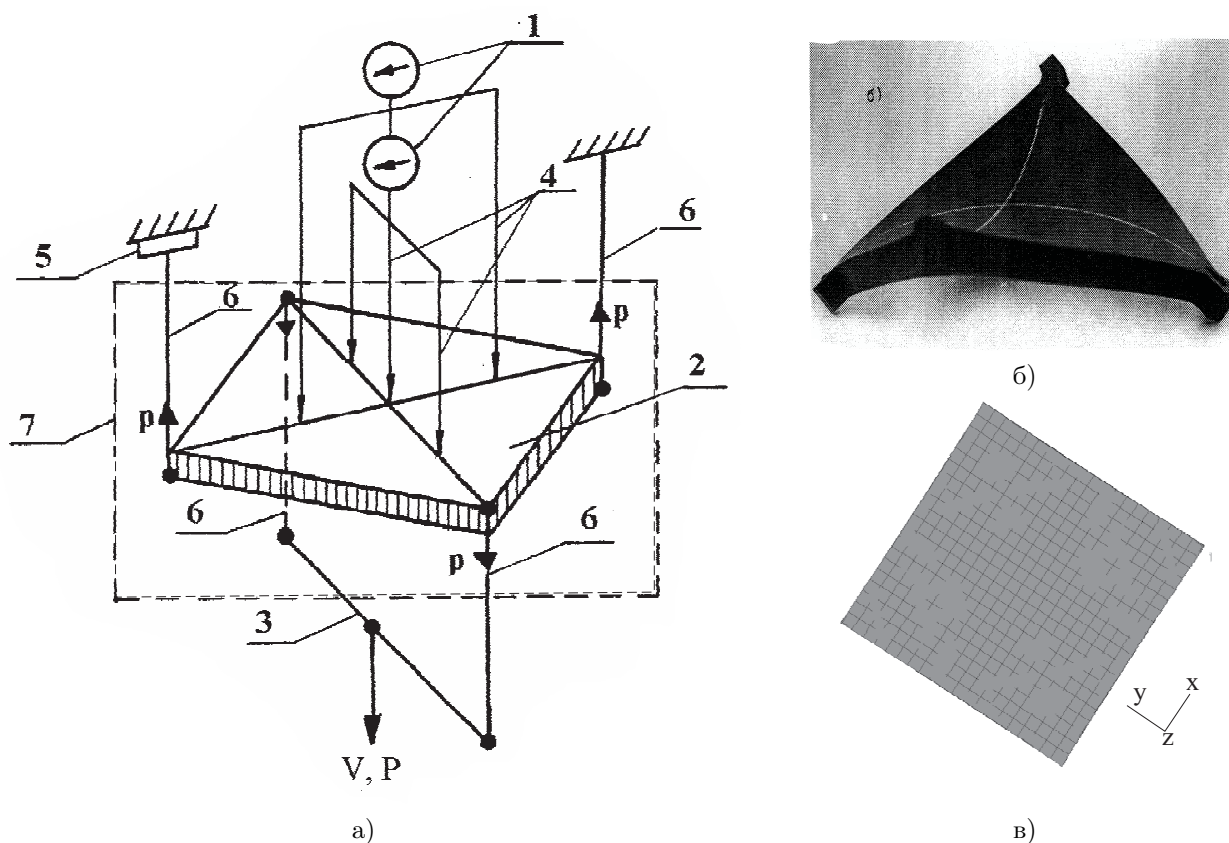


Рис. 1. Кинематическая схема экспериментальной установки на формовку (а), вид образца детали типа “седло” (б), вычисленная заготовка (в)

“седло” (рис. 1). Размеры заготовки были заданы равными $200 \times 200 \times 20$ мм. Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составило 0.24 мм. В сравнении с результатами решения этой же задачи в DynaForm и в UG-NX4, согласование результатов, полученных по новой методике, лучше более чем в пять раз.

Предлагаемая методика вычисления геометрической модели заготовки по САД-модели детали сложной кривизны учитывает деформационно-прочностные характеристики материала заготовки и характеристики типового технологического процесса изготовления детали. Один из результатов применения данной методики представлен на рис. 2, на котором приведены САД-модель крыльевой панели (а) и геометрическая модель заготовки (б) (показана характерная корневая часть заготовки), соответствующая данной технологии изготовления панели из плиты алюминиевого сплава.

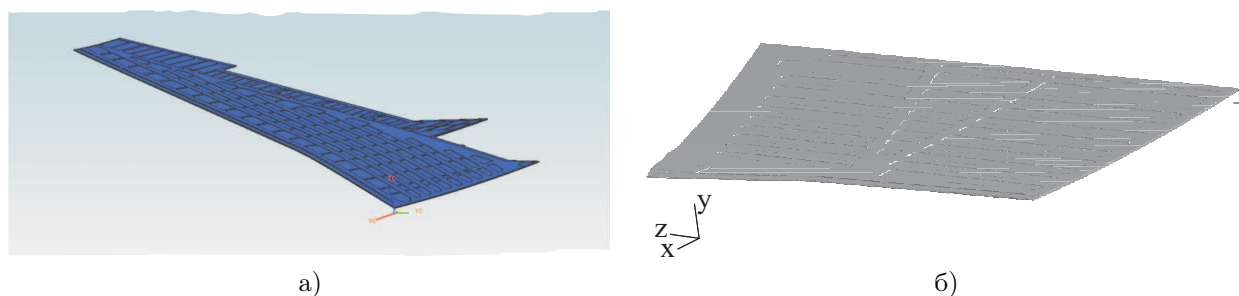


Рис. 2. Геометрические модели панели (а) и заготовки (корневая часть) (б)

3.2. Моделирование процессов формообразования. Отработка рабочих контуров и технологических процессов. Надежность моделирования процесса формовки устанавливалась прямым сравнением экспериментальных данных с расчетными. Для проверки расчета использовались данные по

формообразованию детали двойной знакопеременной кривизны (рис. 1б) в режиме установившейся ползучести согласно схеме рис. 1а. Результаты моделирования процесса формообразования этой детали из образца плиты алюминиевого сплава показаны на рис. 3.

В расчете программой MSC.Marc деформации предполагались малыми, повороты и перемещения могли быть большими. Отсчетной конфигурацией предполагалась вычисленная геометрическая модель заготовки (рис. 1в), она же являлась и естественной конфигурацией. В качестве сопряженных в отсчетной конфигурации тензоров напряжений и деформаций выступали второй тензор напряжений Пиола-Кирхгофа и тензор деформации Грина-Лагранжа. Данная трехмерная задача квазистатического деформирования решалась пошаговым интегрированием по схеме Эйлера с линеаризованными относительно момента времени определяющими соотношениями и, вследствие последнего, с уточнением решения на каждом дискретном моменте времени итерационной процедурой метода Ньютона-Рафсона (или одной из его модификаций). Аппроксимация уравнений по пространственным координатам и самого тела производилась методом конечных элементов (МКЭ) с восьмистами трехмерными гексагональными изопараметрическими восьмиузловыми элементами Hex8, в котором перемещения и геометрия аппроксимируются тринейно одним и тем же набором полиномов. Шаг по времени был достаточно мал, чтобы удовлетворить заданным требованиям точности вычислений.

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными (светлые точки на рис. 3), а также с данными программы Ansys. В базе моделей материалов этих программ нет разномодульных, поэтому вначале пришлось считать по имеющейся степенной модели (Нортон) с постоянными материала на сжатие или на растяжение. Результаты — кривые прогиба для этих констант — приведены на рисунке пунктиром. Мы видим, что расхождение с экспериментом существенное, поскольку модель Нортон не учитывает обнаруженную разнсопротивляемость сплава. Оказалась необходимой теория ползучести и пластичности для изотропной разномодульной среды. Ее можно построить на основе разложения потенциала напряжений в пространстве девяти скоростей деформаций [3]. Вариант разномодульных определяющих соотношений был внедрен в программу MSC.Marc посредством разработанной специальной программы пользователя (автор С. Н. Коробейников), которая расширила существующую базу моделей материалов этого комплекса на случай разнсопротивляемости материала. Из рис. 3 (кривая 3) видно, насколько улучшилось согласие с экспериментом; совпадение расчетных и экспериментальных данных получилось почти идеальное.

Виртуальная отработка технологии формовки требует анализа распределения напряжений в заготовке в процессе формообразования. На рис. 4 представлено расчетное распределение интенсивности касательных напряжений и конфигурация заготовки непосредственно перед разгрузкой. Кроме того, в

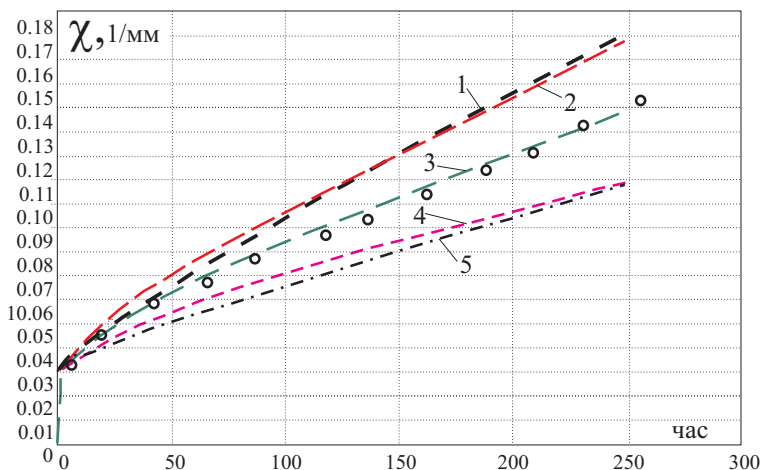


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения главных кривизн заготовки в процессе формообразования “седла”: эксперимент, $p = 1850$ кг (\circ), данные ANSYS при константах на растяжение (1), данные MSC.Marc при константах на растяжение (2), данные MSC.Marc при константах модели разнсопротивляющейся среды (3), данные MSC.Marc при константах на сжатие (4), данные ANSYS при константах на сжатие (5)

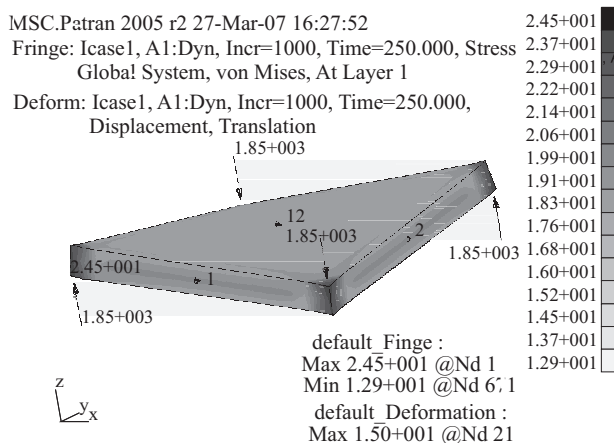


Рис. 4. Распределение интенсивности касательных напряжений и конфигурация заготовки перед разгрузкой

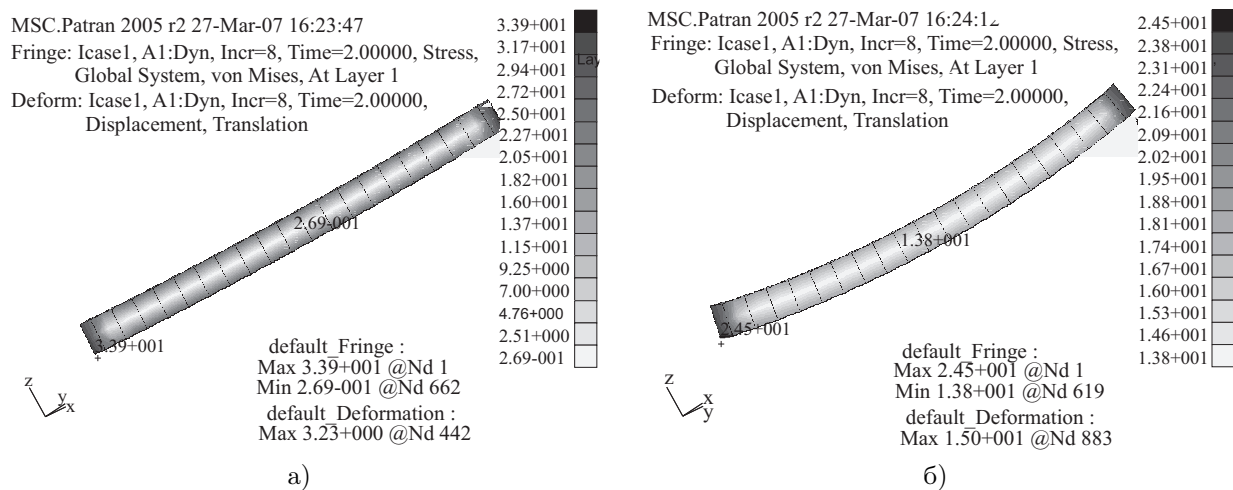


Рис. 5. Распределение интенсивности касательных напряжений в диагональном сечении заготовки в начале процесса (а) и перед разгрузкой (б)

процессе формовки необходим постоянный контроль запаса прочности материала заготовки в наиболее опасных сечениях. На рис. 5 приведено распределение интенсивности касательных напряжений в диагональном сечении заготовки как перед разгрузкой (б), так и в начале процесса формовки (а). Эти данные свидетельствуют о характерных особенностях исследуемого процесса формовки в режиме установившейся ползучести. Эта новая технология позволяет получать детали при существенно меньших интенсивностях напряжений с одновременной релаксацией внутренних напряжений.

На практике реализация формовки осуществляется при помощи специальной оснастки, в которой происходит деформирование заготовки. Определяющим геометрическим параметром оснастки являются рабочие контуры, к которым должна быть прижата заготовка перед разгрузкой. После разгрузки заготовка должна с заданным припуском попасть в конфигурацию САД-модели панели. Вычисление рабочих контуров предполагает анализ распределения кривизн по площади заготовки. Данные вычисления также верифицировались на эксперименте о формообразовании детали (рис. 1б). На рис. 6 показано распределение прогибов по площади заготовки перед разгрузкой.

Для панели вида, указанного на рис. 2а, рабочие контуры оснастки имеют вид, изображенный на рис. 7а. На этом же рисунке показан момент счета, соответствующий прижатию заготовки к данным рабочим контурам оснастки. Результаты моделирования (рис. 7в) показали возможные зоны исчерпания прочностных и пластических ресурсов материала заготовки, в связи с чем была произведена корректировка техпроцесса. Виртуальная их отработка на рассмотренных кластерных вычислительных комплексах позволила существенно ускорить постановку панелей на производство, минимизировать материальные и трудовые затраты, сохранить ресурс материала изделия.

4. Выводы.

1. Разработано и апробировано кластерное вычислительное обеспечение высокоточного трехмерного моделирования технологических процессов обработки металлов давлением, совмещенных с термообработкой, при формообразовании крупногабаритных монолитных элементов конструкций двойной кривизны из листовых фрезерованных заготовок и плит современных сплавов в режимах ползучести.

2. Лицензионные программы распределенного инженерного анализа дополнены разработанными программными модулями, обеспечивающими учет особенностей деформирования материала заготовок при повышенных температурах.

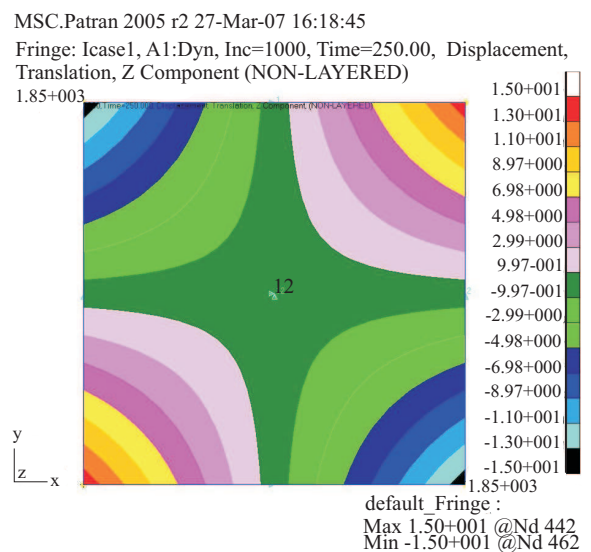


Рис. 6. Распределение прогибов по площади заготовки перед разгрузкой

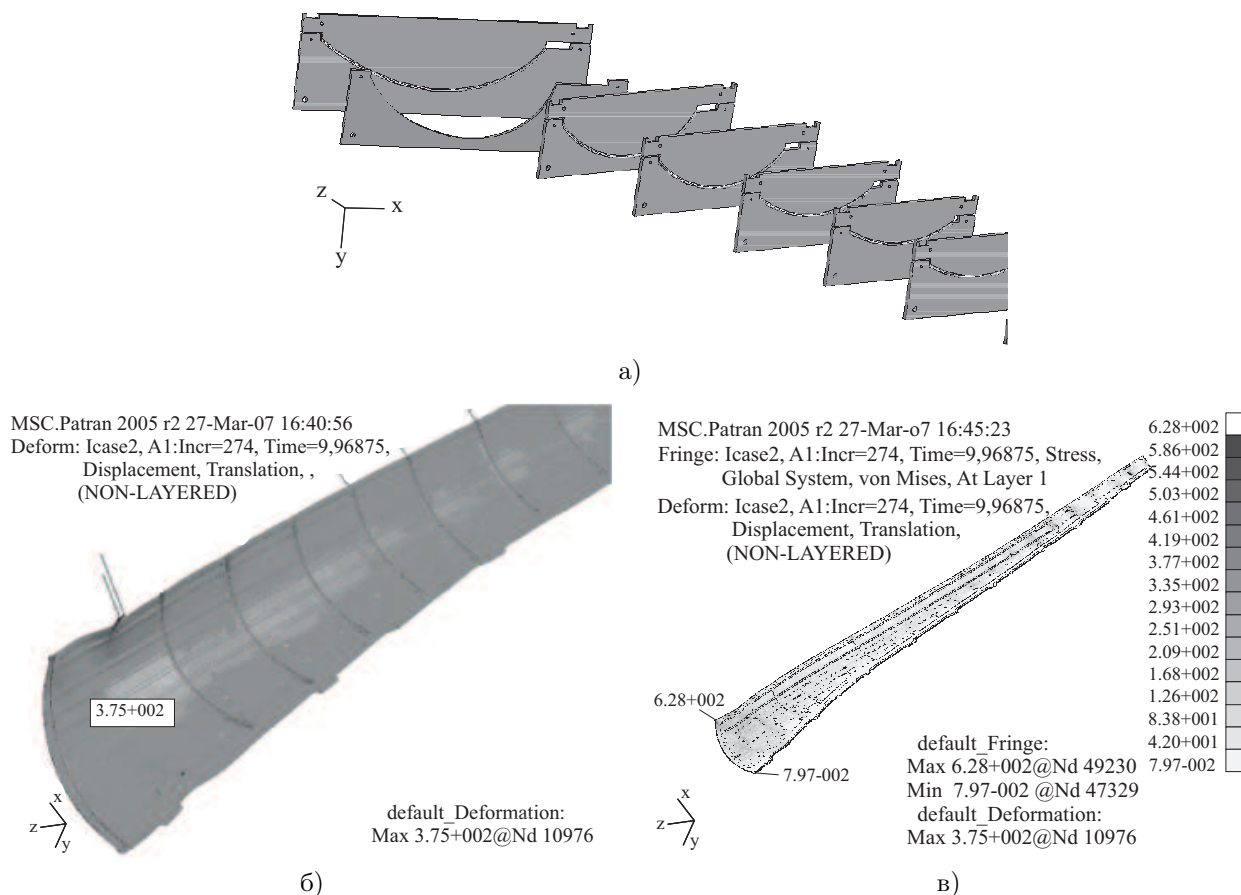


Рис. 7. Участки оснастки для формообразования панелей (а) и заготовки, прижатой к рабочим контурам (б); распределение интенсивности напряжений (в)

3. Реализация на организованных вычислительных кластерах новых алгоритмов и полномасштабной теоретической модели процесса позволяет рассчитывать трехмерные геометрические модели развертки и штамповой оснастки для формообразования панелей.

4. Данные программно-кластерные средства виртуальной отработки прогнозируют возникновение таких браковочных признаков заготовки, как потеря устойчивости неупругого деформирования, недопустимая разнотолщинность, образование гофра, недопустимое пружинение, неприслегание заготовки к поверхности пуансона, разрушение заготовки. По результатам виртуальной отработки может быть проведена необходимая коррекция режимов технологического процесса и управляющей программы технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олейников А.И. Моделирование процессов формообразования панелей российского регионального самолета — RRJ/0 // IX Всероссийский съезд по теорет. и прикл. механике. Аннотации докладов. Т. 3. Н. Новгород, 2006. 162.
2. Савяк В. Эффективные кластерные решения (<http://www.ixbt.com>).
3. Олейников А.И. Об описании деформирования гетерогенно-сопротивляющихся материалов // Докл. РАН. 1998. 361, № 6. 773–774.

Поступила в редакцию
22.03.2007