УДК 621.775

РАЗРАБОТКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧЕК И ПРОФИЛЕЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Галкин В.И., Нуждин В.Н., Преображенский Е.В.

Волокнистые композиционные материалы (ВКМ) с металлической матрицей обладают высокими значениями удельной прочности и жесткости в сочетании с улучшенными эксплуатационными характеристиками, что отвечает требованиям современной авиационной и космической техники. Повышение жесткости конструкций и снижение массы основных узлов летательных аппаратов может быть достигнуто путем замены традиционных материалов на ВКМ. Это относится в частности к оболочкам, используемым в узлах конструкций, подвергающихся нагреву от реактивной струи двигателя, и стрингерам - продольным элементам жесткости, подкрепляющим обшивку фюзеляжа летательного аппарата.

При получении оболочек из ВКМ могут использоваться процессы газо- и гидростатического прессования, термокомпрессия; известен способ производства сборных оболочек из бороалюминиевых секций, полученных гибкой и клёпкой армированных листов. Недостатками таких процессов являются ограничения размеров получаемых изделий, частичное термическое разупрочнение волокон, сложность эксплуатации оборудования, низкая производительность процессов.

Несмотря на многоступенчатый характер технологии производства изделий из ВКМ, можно сформулировать ряд общих требований к процессам их изготовления. Технологические процессы должны обеспечивать: равномерное распределение волокон в матрице, с заданным шагом, геометрией ячейки и характером армирования; прочную адгезионную связь между волокнами и матрицей, а также между матричными слоями; полное уплотнение композита; сохранение целостности волокон и их исходной прочности.

Малая изученность процесса изготовления оболочек из ВКМ методом обкатки делает необходимым проведение комплексных исследований в области разработки и управления технологическими процессами производства армированных оболочек. Для этих целей наиболее часто используется критериальная система, применяемая при разработке твердофазных способов изготовления продукции из ВКМ.

Очевидно, что для условий однопроходной обкатки процесс формирования прочного соединения протекает за две стадии. Поэтому и очаг деформации следует разделить на две части. Границей раздела должно стать сечение, где заканчивается уплотнение сборной заготовки. Таким образом, на первой стадии обеспечиваются условия для образования полного физического контакта компонентов. На второй – происходит адгезионное взаимодействие матричной составляющей с волокнами, тем самым осуществляется окончательное создание прочного соединения компонентов ВКМ.

Учитывая специфику процесса производства изделий методом обкатки и форму очага деформации, следует отметить, что скорость деформирования в вертикальном направлении будет изменяться от максимальной на входе заготовки в зев валков до минимальной на выходе. Это весьма благоприятно с точки зрения формирования соединения компонентов, а также с точки зрения сохранения сплошности волокон, что можно подтвердить анализом процесса компактирования с позиций критериальной системы.

Первое критериальное выражение дает оценку минимальной степени деформации, необходимой для получения компактного строения материала [1]:

$$\varepsilon_{\min} = K_{НП},$$

где $\varepsilon_{\min}$ – степень деформации заготовки, обеспечивающая полный физический контакт между компонентами ВКМ;

$K_{НП}$ – коэффициент неплотности, зависящий от типа заготовки.

Величина $\varepsilon_{\min}$ говорит о том, что процесс с меньшими степенями деформации невозможен, так как в противном случае не будет обеспечена компактность материала.

Скоростные условия процесса компактирования основываются на втором критерии, который учитывает влияние параметров оборудования и дополнительной деформации заготовки, имеющей место во второй зоне очага деформации. Эта зона должна быть по возможности максимально протяженной, так как процесс образования прочного соединения определяется наряду с другими параметрами и временем прохождения адгезионного взаимодействия компонентов. Исходя из этого, угловая скорость обкатки рассчитывается по следующему выражению:

$$n = \frac{1}{t_a}\sqrt{\frac{\Delta h_{доп}}{4\pi^2 \cdot R}} = \frac{1}{t_a}\sqrt{\frac{\varepsilon_{доп} \cdot H_0}{4\pi^2 \cdot R}}$$

где $\Delta h_{доп}$ – дополнительное абсолютное обжатие заготовки, проходящее во второй зоне очага деформации;

R – радиус валков установки для обкатки;

t_a = 0,02с – величина времени активации пары АД1-бор (при 480-500°С).

Неизвестной величиной в этой формуле является $\Delta h_{доп}$, либо $\varepsilon_{доп}$, которую можно определить с помощью третьего критериального выражения. $\Delta h_{доп}$ представляет собой дополнительное обжатие скомпактированной заготовки, которое она может воспринять без разрушения волокон.

Вследствие того, что во второй зоне очага деформации находится уже компактный материал, зависимость между напряжениями и деформациями можно представить в виде преобразованной формулы Целикова [2]:

$$\sigma_f^* = \frac{\sigma_{sc}^*}{\delta}\left[(\delta+1)\cdot\left(\frac{H_1 + 2R - \sqrt{4R^2 - R\Delta h_{доп}}}{H_1}\right)^{\delta} - 1\right],$$

где σ_f^* – временное сопротивление разрушению волокна при поперечном сжатии, для бора σ_f^* = 150МПа;

σ_{sc}^* – напряжение компактирования ВКМ;

δ – показатель, равный:

$$\delta = \frac{2 \cdot l_2 \cdot \mu}{\Delta h_{доп}},$$

где μ – коэффициент трения.

Последнее уравнение содержит одну неизвестную величину – максимально допустимое обжатие $\Delta h_{доп}$. Ее можно найти с помощью метода последовательных приближений. Это дает возможность установить общую степень деформации сборной заготовки в процессе компактирования:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{\min} + \varepsilon_{доп}$$

Суммарная степень деформации ВКМ определяет требуемый скоростной режим обкатки. Расчеты показали, что в большинстве вариантов (с различными радиусами валков) скорость обкатки составляет менее 0,02м/с, поэтому практически невозможно реализовать процесс получения армированных оболочек на стандартных прокатных станах за один проход.

Кроме того, у стандартных прокатных станов управляющим параметром является степень деформации сборной заготовки, которая обеспечивается с помощью фиксируемого зазора между валками. Для компактирования заготовок ВКМ более приемлемо в качестве

управляющего параметра выбрать прикладываемое давление инструмента на заготовку, так как в силу объективным причин (отклонение толщины заготовки, температуры процесса и т.п. от расчетных значений) при деформации может случиться, что материал окажется либо недокомпактированным, либо продеформированным с обжатиями больше допустимых. Приложение же расчетного усилия позволяет гарантированно получать качественные армированные изделия.

Потребное усилие можно определить по формуле:

$$P = \frac{2R}{H_0} \cdot \frac{B \cdot l}{\varphi_0} \cdot \left[a \cdot \left(\frac{\varphi_0}{2} + \frac{1}{4}\sin 2\varphi_0 - \sin\varphi_0 \cdot \cos\varphi_0 + \frac{\mu}{2} \cdot \sin^2\varphi_0 - \mu \cdot \cos\varphi_0 \cdot (1 - \cos\varphi_0) \right) + \right.$$

$$+ b \cdot \frac{2R}{H_0} \cdot \{ \sin\varphi_0 - \frac{\sin^3\varphi_0}{3} + \frac{\mu}{3}(1 - \cos^3\varphi_0) - \varphi_0 \cdot \cos\varphi_0 - \cos^2\varphi_0 \cdot \sin\varphi_0 -$$

$$- \mu \cdot \cos\varphi_0 \cdot \sin^2\varphi_0 + \cos^2\varphi_0 \cdot \sin\varphi_0 + \mu \cdot \cos^2\varphi_0 \cdot (1 - \cos\varphi_0) \} +$$

$$+ c \cdot \left(\frac{2R}{H_0} \right)^2 \cdot \{ \frac{3}{8}\varphi_0 + \frac{1}{4}\sin 2\varphi_0 + \frac{1}{32}\sin 4\varphi_0 - 3\cos\varphi_0 (\sin\varphi_0 - \frac{1}{3}\sin^3\varphi_0) - \cos^3\varphi_0 \sin\varphi_0 +$$

$$\left. + 3\cos^2\varphi_0 (\frac{1}{2}\varphi_0 + \frac{1}{4}\sin 2\varphi_0) + \frac{3\mu}{2}\cos^2\varphi_0 \sin^2\varphi_0 + \frac{7\mu}{4}\cos^4\varphi_0 + \frac{\mu}{4} - \mu\cos\varphi_0 - \mu\cos^3\varphi_0 \} \right]$$

где φ_0 – угол, соответствующий длине дуги захвата l;

B – ширина заготовки (высота получаемой оболочки);

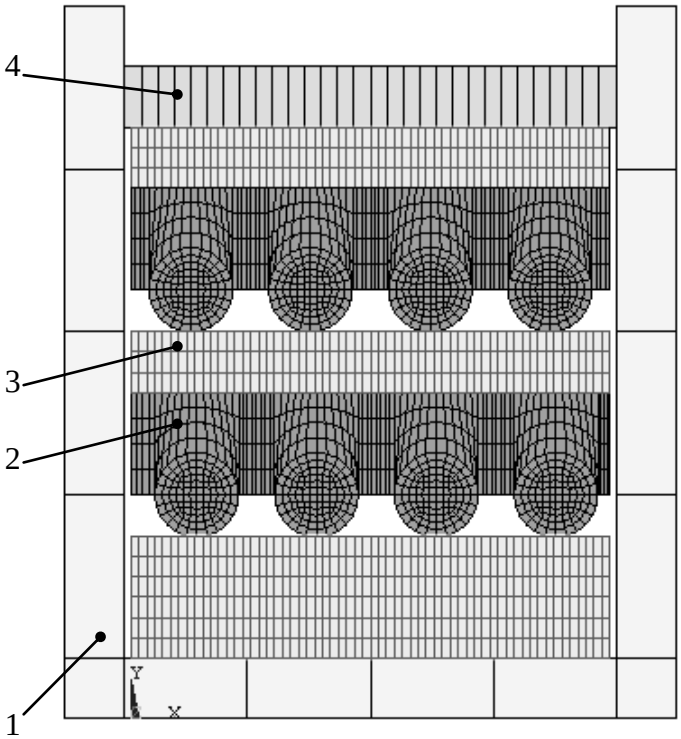
a, b, c – коэффициенты аппроксимации в функциональной зависимости напряжения компактирования от степени деформации:

$$\sigma_{sc}^{*} = a \cdot \varepsilon + b \cdot \varepsilon^2 + c \cdot \varepsilon^3$$

Численные значения коэффициентов аппроксимации следует определять в ходе экспериментальных исследований. Достаточно точные результаты (для АД1-бор при $К_{нп}$=35%: a = 558,61МПа, b = -2233,4МПа, c = 3159,6МПа) можно получить при помощи математического моделирования.

Кроме того, математическое моделирование позволяет оценить влияние технологических параметров на свойства ВКМ и изучить возможность регулирования напряженно-деформированным состоянием при допустимых температурно-скоростных условиях процесса.

Математическая модель для расчета напряжения компактирования



1 – контейнер
2 – плазменная лента
3 – матричная составляющая (фольга)
4 – верхняя плита (инструмент)

Рис.1

В данной работе моделировался процесс компактирования сборной заготовки между плоскопараллельными плитами. Для этого применялся метод конечных элементов, реализованный в программном пакете ANSYS.

Задачи пластического течения рассматривались для плоского случая (рис. 1). Математические модели состояли из чередующихся слоев матричных прослоек и плазменных лент – полуфабрикатов, наиболее часто используемых при производстве изделий из ВКМ. Изучаемая область разбивалась четырехузловыми мультиплекс-элементами, которые обеспечивают хорошую точность при больших деформациях.

Перемещением верхней плиты моделировался процесс компактирования. При этом исследовалась динамика изменения накопленной деформации и напряжений (рис.2), изучалось взаимное влияние волокон соседних рядов, рассматривалась зависимость напряжения компактирования от степени деформации, анализировалась средняя величина нагрузки на волокна.

Изменение напряжения σ_y на конечном этапе моделируемого процесса

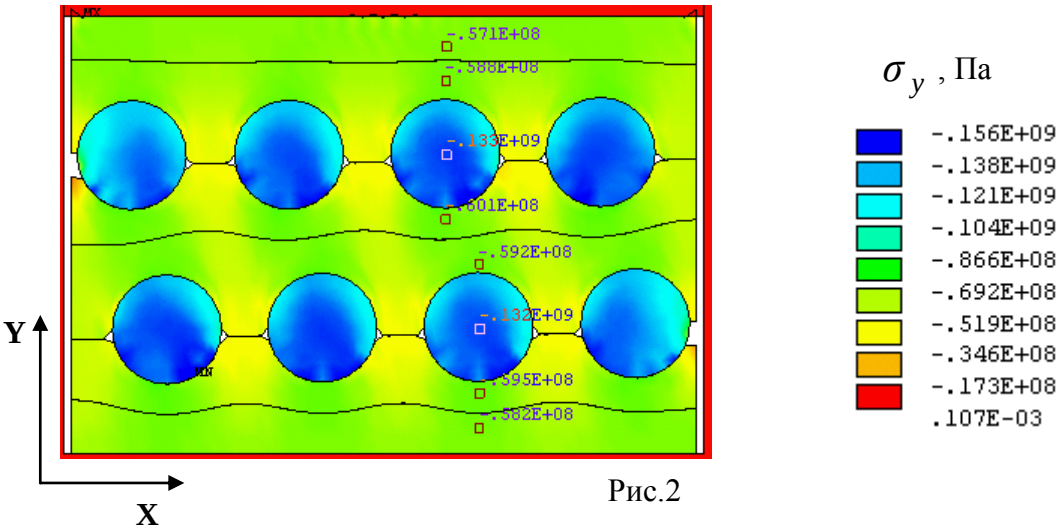


Рис.2

На основании моделирования выведены зависимости для определения напряжения компактирования на любой стадии деформационного процесса (рис.3). Для этого определялось усредненное значение напряжения компактирования при различном смещении одного ряда волокон относительно соседнего. После аппроксимации, предложена полиномиальная зависимость для расчета напряжения компактирования сборной заготовки, с учетом ее строения. Полученный кубический полином использовался в дальнейшем при расчете усилия обкатки.

Зависимость напряжения компактирования от степени деформации сборной заготовки

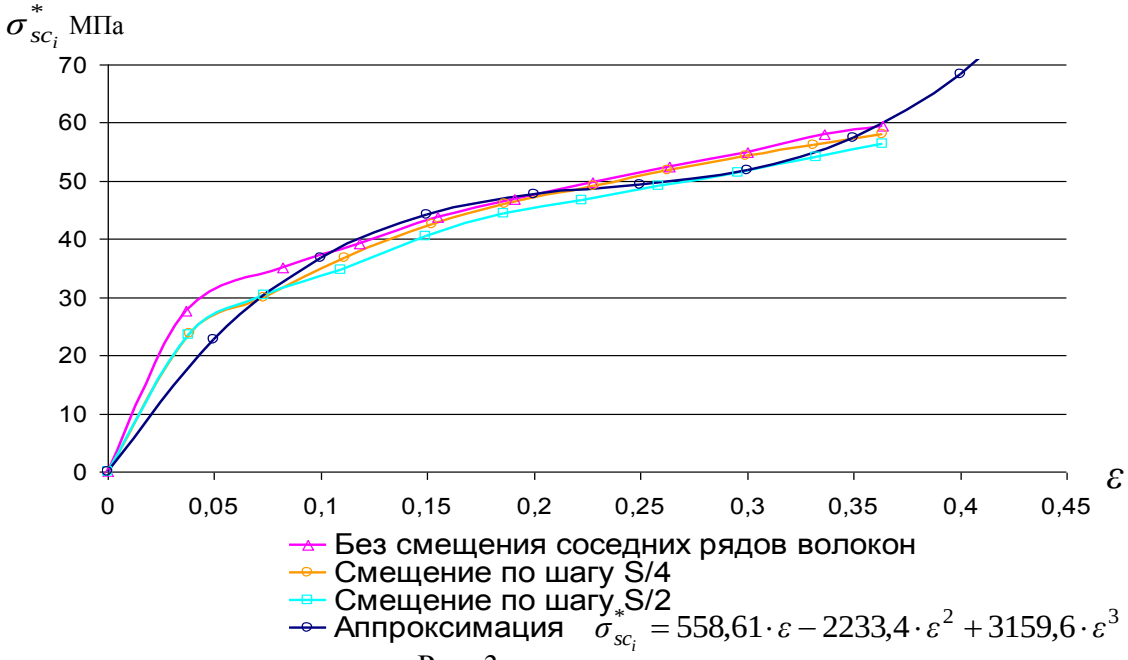


Рис. 3

Результаты математического моделирования легли в основу расчета технологических параметров процесса обкатки оболочек. Для проверки предложенных зависимостей соотношения геометрических параметров зоны деформации и напряженно-деформированного состояния, проведены эксперименты по получению армированных оболочек из ВКМ АД1-бор. Для оценки влияния технологических параметров процесс осуществлялся как по расчетным режимам, так и с отклонением от оптимальных значений. Расчетные значения (заготовка с длиной образующей 100мм, радиус валков 50мм): температура 480-500°С; усилие обкатки 29,5кН; скорость 30мм/с.

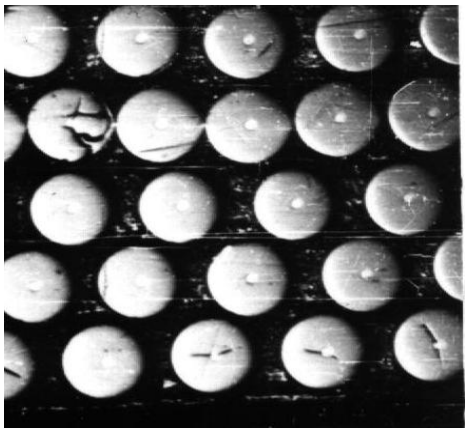


Рис.4 x50

Изделия, полученные по расчетным параметрам, имеют хорошо проработанную структуру и компактное строение, волокна равномерно распределены по объему матрицы (рис. 4). Фракционный анализ показал, что абсолютное большинство из них сохраняют сплошность. По виду фрактограмм можно сделать вывод о качественном соединении компонентов на границе волокно-матрица. Механические свойства бороалюминиевых оболочек толщиной стенки 1мм с содержанием 0,25 объемных долей армирующего компонента близки к расчетным (σ_c=780-810МПа, E_c=140-145ГПа).

Таким образом, технологический процесс обкатки за один проход позволяет получать качественные армированные изделия, при этом

повышается производительность процесса; происходит снижение разупрочнения борных волокон, благодаря отсутствию термоциклирования. Кроме того, по сравнению с технологией шагового прессования полученные оболочки из-за отсутствия зон перехлеста обладают стабильностью свойств. Принимая во внимание специфику производства изделий из ВКМ, спроектирована установка для обкатки (рис.5), обеспечивающая требуемое усилие благодаря приводу от гидравлического пресса.

Установка для обкатки

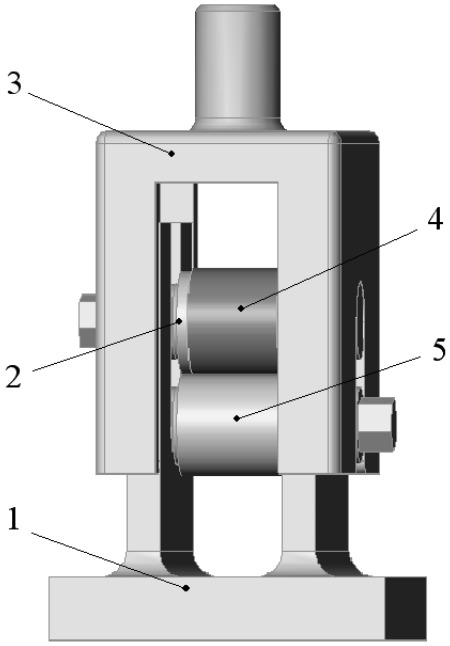


Рис. 5

Получение оболочки происходит следующим образом: заготовка (4) собирается методом намотки непосредственно на валке (2), на который предварительно нанесена графитовая смазка. Затем оба валка (2, 5) нагреваются до требуемой температуры, последовательно помещаются в пазы станины (1) и за счет гидравлического привода через прижим (3) прикладывается расчетное усилие на цапфы верхнего валка. Дальнейшее компактирование происходит при вращении валка с заданной угловой скоростью.

Возможности спроектированной установки позволяют осуществлять на ней, помимо обкатки, прокатку для получения компактных листовых полуфабрикатов из ВКМ, при изготовлении которых требуется строгое соблюдение силовых и температурно-скоростных условий процесса. Кроме этого, путем переналадки (смены валков) целесообразно использовать данную установку для гибки профилей.

Наиболее приемлемой для трансформации компактных листовых заготовок из ВКМ в пространственные изделия с требуемой геометрией формы является операция гибки, осуществляемая в направлении, когда ось изгиба параллельна армирующим волокнам. Исследования в области изготовления гибкой изделий из однонаправленных ВКМ сводятся, по-существу, к оценке их технологической пластичности, использованию специальных заготовок и поиску специальных технологических приемов гибки, направленных на достижение приемлемого радиуса изгиба [3].

Существующие способы производства профилей из ВКМ имеют свои недостатки. В случае использования заготовки с выборочным армированием несущая способность изделия оказывается пониженной. Проведение гибки с использованием подпирающих пластин при повышенной температуре затруднено из-за невозможности сохранения постоянной температуры в течение рабочего цикла. Con-clad процесс является весьма трудоемким.

Основным преимуществом гибки в штампах является наличие интенсивного радиального воздействия на очаг деформации, вызывающего увеличение гидростатического давления, что повышает технологическую пластичность материала матрицы, и, как следствие, позволяет проводить гибку с меньшим относительным радиусом. Существенным недостатком такой схемы является ограниченная длина получаемых профилей, обусловленная размерами штампа.

Разработана новая схема производства профилей методом гибки – прокатки в валках с жестко-эластичным радиальным подпором заготовки (рис. 6). Направляющая, препятствующая изгибу профиля в продольном направлении, на рисунке не показана.

Предлагаемая схема производства профилей

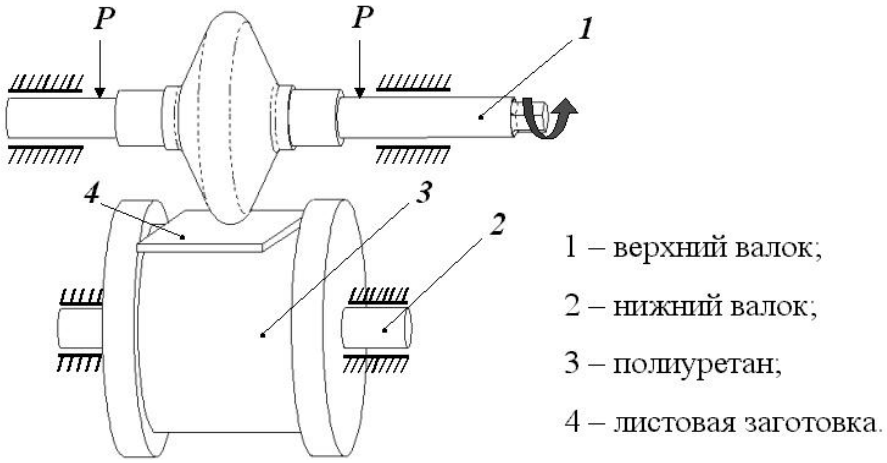


Рис. 6

Для реализации предлагаемой схемы используются критерии [4], позволяющие учесть специфическое строение ВКМ и особенности его формоизменения гибкой:

1. $\sigma_{\theta max} < \sigma_{mf}$

Первое неравенство свидетельствует о том, что максимальное тангенциальное напряжение в зоне растяжения не должно превышать прочности соединения составляющих композита.

2. $\varepsilon_{mi} < \delta_m$

Следующее неравенство указывает на то, что деформация матрицы в данном слое зоны растяжения не должна превышать величины относительного удлинения матричной составляющей композита.

3. $r/h = \dfrac{S(h - d_f - 2h_m) - \delta_m h(S - d_f)}{2\delta_m h(S - d_f)}$

Относительный радиус изгиба зависит от параметров заготовки и относительного удлинения матричной составляющей композита.

Математическое моделирование процесса гибки компактной листовой заготовки из ВКМ позволяет оценить влияние технологических параметров, таких как угол и относительный радиус изгиба, объемная доля волокон и др. на механические и технологические характеристики получаемого профиля.

Математическое моделирование проводилось с использованием конечно-элементного пакета ANSYS. Процедура расчета конечно-элементной модели в ANSYS делится на три основных этапа:

- построение модели и определение контактных пар;
- приложение нагрузок (включая граничные условия) и получение решения;
- просмотр и анализ результатов.

Первый этап заключается в построении геометрической модели, указании типов конечных элементов и свойств материалов.

Свойства материалов пуансона, контейнера, борного волокна и полиуретана задавались путем назначения соответствующих модулей упругости и коэффициентов

Пуассона. Свойства матричного материала (алюминий) устанавливались особым способом, предлагаемым в пакете ANSYS. В соответствии с этим способом, изотропные свойства для упругих материалов могут быть заданы в табличном виде (результатом задания свойств в таком виде является кривая "напряжение-деформация").

В работе рассмотрена двухмерная модель гибки компактного листового ВКМ (рис. 7). В математической модели учитывается влияние как тангенциальных напряжений в заготовке, так и радиального подпора со стороны полиуретана, то есть двух наиболее важных факторов, определяющих исследуемый процесс.

Математическая модель

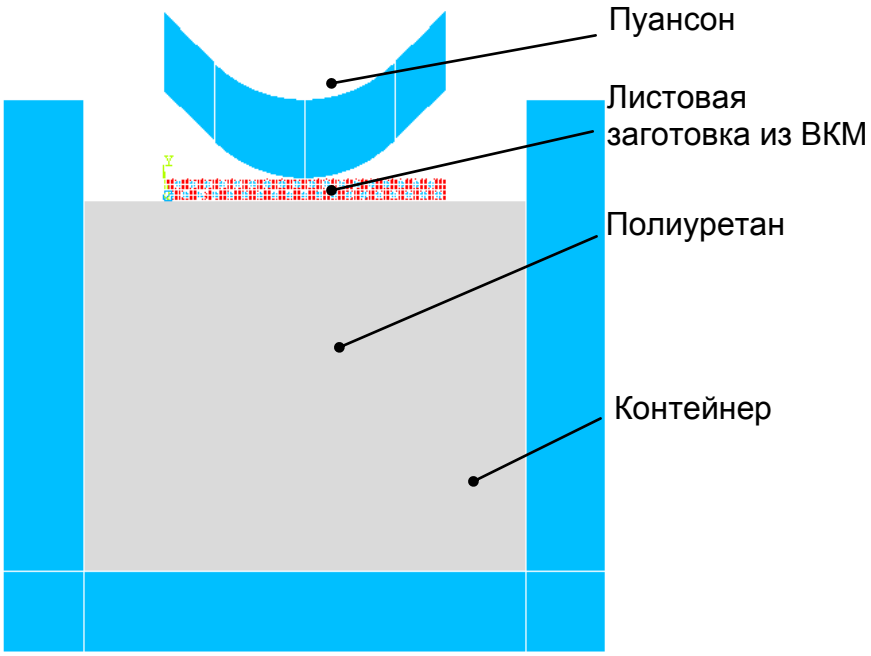


Рис. 7

Укрупненный вид зоны контакта заготовки с пуансоном после разбивки на конечные элементы показан на рис. 8.

Очаг деформации после разбивки на конечные элементы

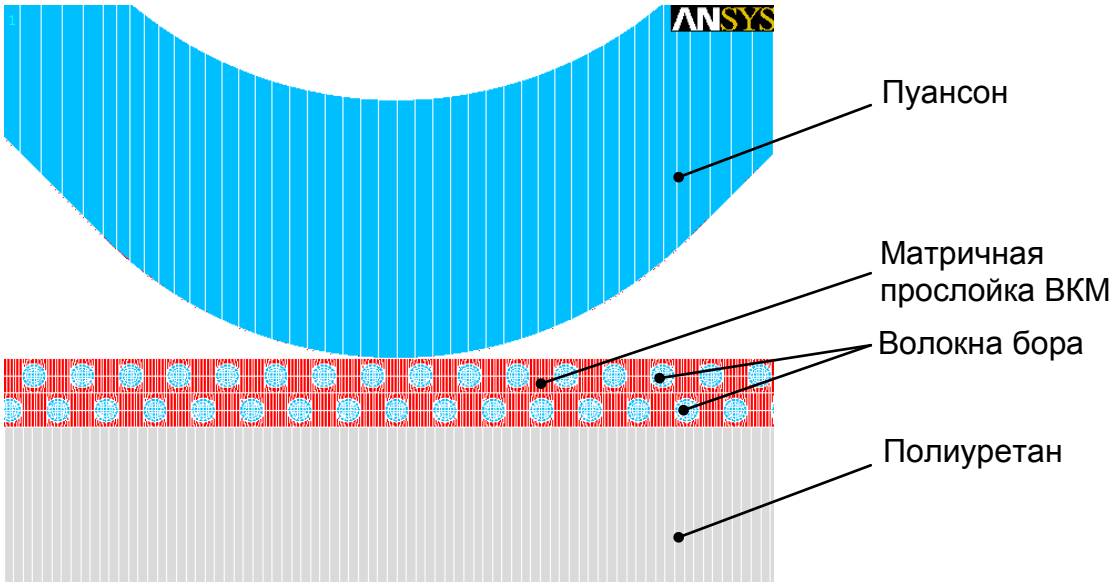
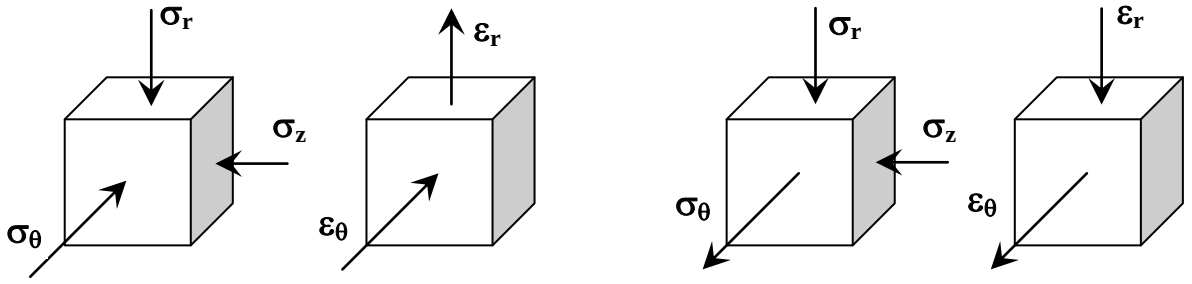


Рис. 8

Общая картина распределения напряжений и деформаций в ВКМ, полученная в результате математического моделирования соответствует напряженно-деформированному состоянию (НДС) при гибке листового материала (рис. 9).

НДС листовой заготовки при гибке

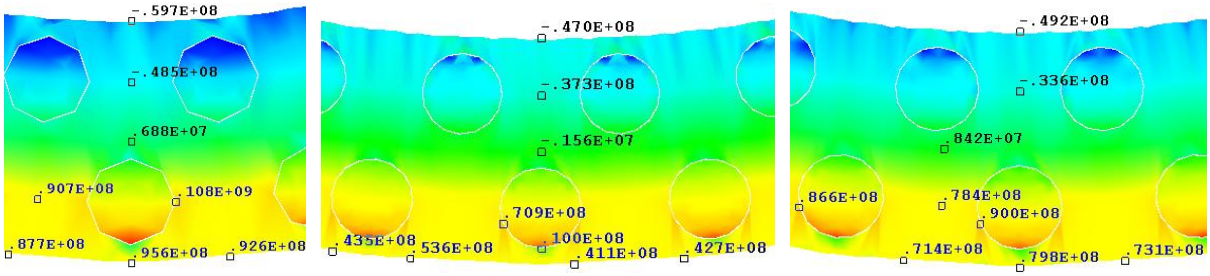


Для верхнего слоя Для нижнего слоя

Рис. 9

Сравнение тангенциальных напряжений при разных относительных радиусах изгиба свидетельствует о том, что минимально допустимым относительным радиусом изгиба является радиус приблизительно равный 5 толщинам моделируемой заготовки. При гибке с меньшим радиусом в матричном материале возникают растягивающие тангенциальные напряжения, превышающие прочность соединения составляющих композита (рис. 10).

Сравнение тангенциальных напряжений
при разных относительных радиусах изгиба



r / h = 4 r / h = 5 r / h = 6

Примечание: напряжения указаны в Паскалях.

Рис. 10

Зависимость максимальных тангенциальных напряжений от r / h имеет почти линейный вид, что позволило определить значение минимально допустимого относительного радиуса методом интерполяции. В результате получено значение 5,17.

Радиальные напряжения в матричном материале на внешнем слое заготовки возрастают. Это обусловлено радиальным воздействием полиуретана на очаг деформации. Следует отметить, что волокна в композиционном материале играют роль внутреннего инструмента, оказывая влияние на характер распределения напряжений (рис. 11).

Радиальные напряжения в матричном материале

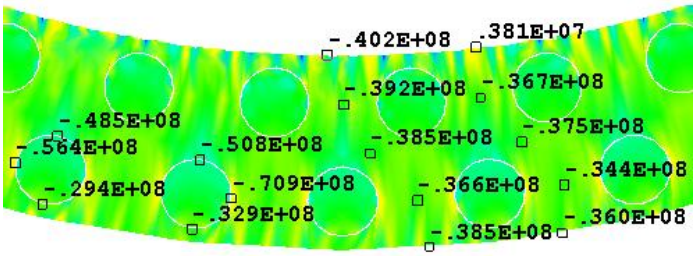


Рис. 11

Радиальное воздействие полиуретана на заготовку неравномерно. Оно убывает по мере удаления от очага деформации. В очаге деформации радиальные напряжения на границе с заготовкой достигают 26 МПа (рис. 12).

Радиальные напряжения в полиуретане

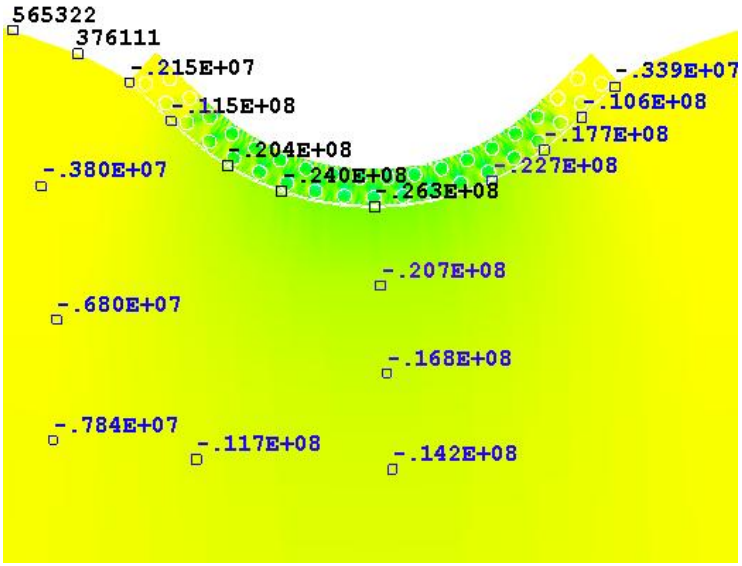


Рис. 12

Результаты математического моделирования процесса получения профилей послужили основой для проектирования универсальной технологической оснастки, которое осуществлялось с применением пакета твердотельного моделирования (рис. 13).

Компактная листовая заготовка из ВКМ помещается между валками. На верхний валок посредством верхнего элемента станины прикладывают требуемое усилие прижима, обеспечивающее изгиб концевого участка заготовки. Затем валки приводятся в движение. В результате образуется профиль по всей длине заготовки.

Проектирование оснастки

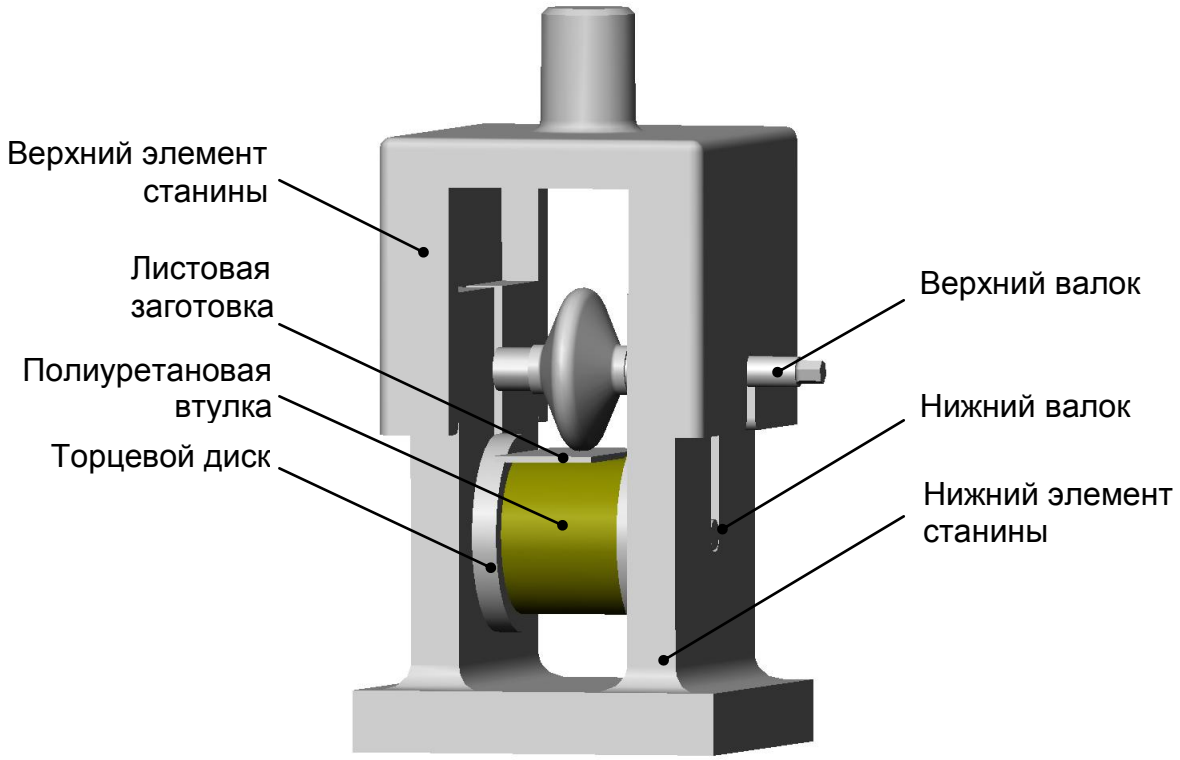


Рис. 13

С целью экспериментальной проверки результатов исследования на кафедре «Технология обработки металлов давлением» МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского проводилась гибка листовых образцов из ВКМ АД1-В. По данным металлографического анализа гибка с относительным радиусом, меньше допустимого, приводит к разрушению материала путем отрыва матрицы от волокон в местах действия максимальных растягивающих напряжений и к последующему развитию трещины. При гибке с допустимым радиусом признаков разрушения материала не обнаружено. Полученные данные согласуются с результатами математического моделирования.

На разработанные способы получения армированных оболочек и профилей из ВКМ поданы заявления о выдаче патента Российской Федерации на изобретение.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработаны технологические процессы, обеспечивающие получение качественных изделий из ВКМ, предложена научно обоснованная методика расчета основных технологических параметров этих процессов, спроектирована и изготовлена универсальная оснастка. На основании математического моделирования получена функциональная зависимость усилия, необходимого для производства оболочек и профилей, от других параметров процесса, оборудования и геометрии заготовки, а также определен допустимый радиус гибки профилей из ВКМ. Получено экспериментальное подтверждение разработанных методик.

Литература:

1. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей. Шоршоров М.Х., Колпашников А.И., Костиков В.И., Мануйлов В.Ф. и др. – М.: Машиностроение, 1981, 272с. с ил.;
2. Колпашников А.И., Арефьев Б.А., Мануйлов В.Ф. Деформирование композиционных материалов. – М.: Металлургия, 1982, 248с.;
3. Смирнов В.И. Исследование процесса гибки армированных листов и разработка технологии производства профилей из волокнистых композиционных материалов системы алюминий-бор. Автореферат кандидатской диссертации. М.: МАТИ, 1984.
4. Композиционные материалы: Справочник/ Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. – М.: Машиностроение, 1990, 512с.; ил.