

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ ИЗ
КОМПОЗИТОВ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ МЕТОДОМ НАМОТКИ**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Исследовано влияние технологических факторов на качество изделий из композитов, изготавливаемых методом намотки. Предлагается проводить поэтапное исследование и анализ влияния на качество изготовления изделий всех основных технологических параметров, причем результаты исследования каждого этапа являются начальными условиями для последующего.

Центральным моментом в механике волокнистых композитов является существенный учет структуры материала на уровне армирующих элементов. На уровне армирующих элементов создаются механические свойства материала; управляя укладкой волокон, можно в определенных пределах управлять полями сопротивления материала, «подстраивая» их под действующие усилия. Более того, на этом пути открываются возможности разработки принципов оптимального проектирования самого материала. В науке о композитных материалах наметились новые тенденции, связанные со стремлением к созданию конструкции многофункционального назначения. Отсюда исследования в области микромеханики композитов, изучающие внутренние поля в средах с дискретной структурой (с учетом несовершенств), изменение эффективных свойств материалов в процессе эксплуатации, связь между структурой на уровне армирующих элементов и теплофизическими, электрическими, магнитными и другими свойствами.

Специфические свойства современных композитов - неоднородность, анизотропия, неупругость – требуют поиска путей построения теорий специализированного характера, учитывающих реальную структуру. Поэтому необходим инженерный подход к решению указанной задачи. При разработке механико-математических моделей должна учитываться информация о свойствах компонентов, их упаковке и взаимодействии в материале. В этой связи одна из важнейших задач механики композитных материалов состоит в прогнозировании деформационных и прочностных свойств композита в функции свойств составляющих композит фаз, их сцепления и т.д.

Возникновение науки о композитах как особой отрасли знания связано с раскрытием специфики объекта ее изучения – технологии переработки, так как требуемая надежность конструкций может быть достигнута только при условии управления технологическими параметрами процесса на всех стадиях их изготовления. Условно исследования можно разделить на две группы: задачи, связанные с реализацией технологического процесса и обоснованием его основных параметров, и задачи учета технологической предыстории механических явлений при расчете изделий.

В процессе технологической переработки композитов на различных его этапах происходят физико-химические и агрегатные превращения, сопровождающиеся изменением механических и теплофизических свойств компонентов и материала в целом. Для учета наследственного влияния механических явлений приходится рассматривать отдельно стадии процесса, определяя их границы агрегатными или структурными состояниями матрицы. Для каждой из стадий в таком случае может быть принята своя обоснованная система упрощающих гипотез. При этом в качестве начальных для очередного этапа принимаются конечные значения переменных на предшествующей стадии. Именно так построены теории, охватывающие весь процесс в целом [1-4].

Технологический процесс переработки композиционно-полимерного материала в конструкции методом намотки можно представить следующей последовательностью этапов.

Процесс переработки начинается с намотки на оправку армирующих элементов, пропитанных полимерным связующим. Различают сухую намотку (с применением предварительно пропитанной и просушенной нити, ленты или ткани) и мокрую намотку, при которой связующее непосредственно вводится в процессе намотки. Намотка может производиться как на холодную оправку, так и на горячую оправку с подогревом изделия до температуры, близкой к температуре термообработки. Конструкция оправки, ее жесткость и характеристики ее теплового расширения также относятся к технологическим факторам. Наконец, намотка может производиться с малыми натяжениями, не влияющими на дальнейшее распределение напряжений в конструкции, и с большими натяжениями. В последнем случае изменение натяжения при переходе от одного витка к другому может оказать существенное влияние на качество конструкции.

Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили необходимость создания переменного по толщине конструкции поля начальных напряжений, создаваемых путем программированного натяжения армирующих элементов. В реальных условиях полимерная матрица, особенно при нагреве, ведет себя как вязкая жидкость. Установлено, что эффекты, связанные со спиральностью, несущественны и оправдано применение концентрически-кольцевой слоистой модели. При решении задачи в линейно-упругой постановке используется для составления уравнений равновесия теория слоистых оболочек, где слои арматуры чередуются с прослойками связующего полимера. Намотка очередного слоя уподобляется надеванию с натягом кольца арматуры. Последующие исследования показали необходимость учета ряда факторов. Во-первых, уже в рамках линейно-упругого решения выявился существенный вклад податливости оправки на падение усилий натяжения. Во-вторых, оказалось, что линейно-упругая постановка задачи не дает возможности описать ряд явлений, наблюдаемых в экспериментах, и, в частности, зависимость относительного давления на оправку от величины усилия натяжения. Это связано с тем, что в радиальном направлении при намотке из-за фильтрации связующего происходит уплотнение материала, сопровождающееся нелинейным ростом его жесткости. Кроме того, для углеродных и органических армирующих элементов необходим учет анизотропии их упругих свойств.

Влияние фильтрации связующего на изменение натяжения арматуры может быть учтено различными способами. Наиболее простой - это связать величину объемного содержания армирующих элементов с давлением от натяжения. Тогда получим нелинейную связь между усилием натяжения и давлением на оправку. Расчетные данные при такой схеме дают удовлетворительное совпадение с экспериментом.

Разогрев конструкции на оправке с последующей термообработкой. На этапе намотки по «мокрому» способу (на подогретую оправку – по «сухому») и при последующем разогреве вязкотекучее связующее мигрирует под действием давления натяжения от внутренних слоев к наружным; происходит уплотнение материала и, как следствие, падение предварительного натяжения армирующих элементов. Характерными особенностями являются зависимость вязкотекучих свойств полимерного материала от температуры и связанного с ним влияния радиального уплотнения материала на интегральные механические характеристики композиционно-полимерного материала.

Следующую группу технологических факторов образуют параметры термообработки. Режим термообработки задается химиками-технологами для получения связующего с заданными механическими свойствами. Однако в рамках заданного режима возможны отклонения, влияющие на конечные качества конструкции. Например, режим охлаждения после окончания термообработки практически не отражается на конечных свойствах связующего. Однако варьируя этим режимом, можно изменять распределение остаточных (технологических) напряжений в готовой конструкции.

Процессы отверждения матрицы протекают, как правило, при воздействии на них внешними источниками энергии. Используется широкий спектр источников и способов подвода энергии. Наиболее распространенным является конвективный подвод тепла. Однако при этом неизбежна неравномерность температурного поля. При больших толщинах она может быть весьма существенной и требуется длительное время для выравнивания температуры по толщине изделия. В таких случаях неоднородность температурного поля неизбежно вызывает неравномерность конверсии по толщине конструкции. Формируется фронт полимеризации.

Особенностью является выделение тепла за счет экзотермичности процессов формирования молекулярной структуры, усиливающее неоднородность температурного и конверсионного полей.

Этап технологической переработки – полимеризация – чрезвычайно важен, так как в этот период происходят структурные превращения в полимерном композите, определяющие в конечном итоге качество готовой продукции. В тонкостенных конструкциях жидкое связующее постепенно переходит в высокоэластическое состояние практически равномерно по всему объему; его фильтрация прекращается. Для этой стадии в [1] была использована теория консолидации, обобщенная на случай, когда учитываются отверждение связующего и его химическая и термическая усадки.

Длительное время предполагалось, что процесс гелеобразования охватывает практически весь реакционноспособный объем. Поэтому основная ответственность за появление макродефектов структуры переносилась на этап охлаждения изделия. Гипотеза о фронтальном распространении конверсионного поля при неравномерном распределении температуры по толщине конструкции позволила установить существенную роль этапа полимеризации и выявить условия формирования макродефектов. Решению комплекса задач, связанных с изучением закономерностей протекающих процессов на этом этапе и разработкой их математических моделей, посвящены работы [3 - 9].

Охлаждение композиционно-полимерного материала вместе с оправкой до температуры стеклования (T_g) полимерного материала. Здесь происходит развитие температурных деформаций в неоднородной среде с нестабильными (зависящими от температуры) и нестационарными свойствами. Также осуществляется переход полимерного материала в новое агрегатное состояние (стеклование), охлаждение до конечной температуры и связанные с этими процессами механические явления (изменение механических и теплофизических свойств, усадочные явления, упругая, прочностная и теплофизическая анизотропия и др.).

Обычно при охлаждении в термокамере центральные слои цилиндра нагреты выше, чем слои, прилегающие к наружной и внутренней поверхностям. Оценка температурных напряжений с учетом такого температурного поля дана в [10 - 13]. Другой вид неоднородного температурного поля, при котором имеется перепад температур между внутренней и наружной поверхностями цилиндра, а температура внутри цилиндра монотонно изменяется по логарифмическому закону, соответствующему решению стационарной задачи теплопроводности, исследован в [14]. Анализ напряженного состояния цилиндра, выполненный в этой работе и основанный на уравнениях плоской задачи теории упругости для ортотропного тела, показал, что с точки зрения величины остаточных напряжений, возникающих при неоднородном температурном поле по сравнению с однородным, существуют «благоприятные» и «неблагоприятные» перепады температур. При благоприятном перепаде температур остаточные напряжения σ_r уменьшаются; если перепад достаточно велик, то напряжения становятся сжимающими. Поэтому благоприятные перепады температур могут быть использованы практически при разработке новых технологических режимов термообработки для уменьшения вероятности расслоений и снижения остаточных напряжений, что может служить дополнением к известным в настоящее время методам снижения технологических температурных напряжений – программированной силовой намотке и послойному отверждению [15 - 18], введению дополнительных слоев – компенсаторов напряжений [19], применению внешнего давления [20], уменьшению максимальной температуры термообработки [21], увеличению времени охлаждения [22]. В частности, из работы [14] следует, что целесообразно создание перепада температур, при котором внутренние слои оболочки нагреты до более высокой температуры, чем наружные.

Идея применения неоднородного по толщине оболочки охлаждения для регулирования величины и кинетики технологических температурных напряжений получила дальнейшее развитие в [23], где предлагалось использовать два различных теплоносителя, омывающих оболочку снаружи и изнутри и охлаждаемых с разной скоростью, что позволяет реализовать благоприятные перепады температур при термообработке.

В исследовании деформации и прочностных свойств композитов существует, как известно, два направления: феноменологическое, которое использует теорию механики анизотропного тела, определяя константы упругости материала на основе экспериментальных

испытаний, и структурное, базирующееся на структуре композита. Структурное направление связывает характеристики композита с механическими характеристиками его компонентов и таким образом прогнозирует свойства композита по свойствам его компонентов. Рассматриваются различные механические свойства компонентов – упругие, вязкоупругие, пластические. Полученные разными авторами результаты сравнительно близки между собой для регулярно армированных материалов [24]; эти результаты согласуются с опытами и поэтому могут быть использованы в практических расчетах.

Традиционно физические соотношения в механике деформируемых сред записываются в виде

$$T_{\sigma} = F(T_s) \quad (1)$$

Согласно (тензор напряжений T_{σ} определяется функцией тензора деформаций T_s , установленной для соответствующего текущего состояния композита, находящегося в данный период времени в плановой технологической переработке.

В настоящее время при решении задач, связанных с определением полей остаточных технологических напряжений и деформаций, весь цикл переработки полимерно-композиционных материалов разбивается на этапы, для каждого из которых можно записать свое определяющее уравнение вида (, основанное на допущении, что время установления локального равновесного состояния намного меньше наблюдаемого этапа. Так, для этапа охлаждения ниже температуры стеклования T_c (полимерный материал – твердое стеклообразное вещество) принимается или линейно-упругая модель [27]

$$T_{\sigma} = C \otimes T_s \quad (2)$$

или вязкоупругая модель наследственного типа с ядрами релаксации и ползучести в форме степенных функций [28]

$$T_{\sigma} = \tilde{C}(T) \otimes T_s \quad (3)$$

Здесь C - тензор четвертого ранга; \otimes - символ тензорного внутреннего умножения; $\tilde{C}(T)$ – оператор наследственного типа.

Для этапа нагревания в процессе полимеризации используются модели твердеющей среды (либо гиповязкоупругой стандартной среды, либо стандартной нестабильной среды), определяющие уравнения для которой записаны в дифференциальной операторной форме [29], или применяется высокоэластичная модель полимера в интегральной форме [30-32]. Здесь принято, что масштаб времени наблюдения значительно меньше времени самого технологического этапа, а физико-механические свойства полимерного материала неизменны. При больших масштабах времени наблюдения постулируется зависимость компонент тензора механических свойств полимерно-композиционного материала от степени конверсии полимерного материала η и локальной температуры T [33]. Иначе принимается модель терморологической среды, для которой справедливы принципы температурно-временной [34] и полимеризационно-временной эквивалентности [35]. Уравнение связи (3) в этом случае записывается в виде

$$T_{\sigma} = \tilde{C}(T, \eta) \otimes T_s \quad (4)$$

Изучение области перехода из высокоэластического в стеклообразное состояние строится на основе обобщенной (нелинейной) модели Максвелла [36]. Однако свойства полимерного

материала при этом считаются линейно зависимыми от температуры, а резкое изменение их параметров в области температуры стеклования игнорируется.

Эффекты исследования, накапливаемые от этапа к этапу, учитываются путем пошагового интегрирования по времени [33,37], согласно которому результаты каждого предыдущего этапа являются начальными условиями для последующего. Изменение физико-механических свойств полимерно-композиционного материала в этом случае описывается с помощью специально введенного параметра n , характеризующего структурное состояние полимерного материала и определяемого из решения кинетического уравнения, записанного посредством импульсивных функций $\delta(t - t_j)$ для технологического цикла в целом [38]. Физические соотношения здесь представлены в виде

$$T_{\sigma} = \tilde{C}[n_j - \delta(t - t_j)] \otimes T_s \quad (5)$$

Использование феноменологических моделей (4), (5), как и (3), ограничивается рамками аксиомы локального состояния равновесия в каждый рассматриваемый момент времени. Разработка более общих математических моделей, адекватно описывающих эволюцию структуры полимерного материала и учитывающих отмеченные особенности полимерно-композиционного материала в процессе переработки, связана с отказом от аксиомы локального состояния и экспериментальным изучением теплофизических и механических свойств твердеющей нестабильной среды, какую представляет собой полимерный материал. Помимо этого, моделям (3) - (5) присущи сложность записи уравнений и необходимость в информации о форме операторов \tilde{C} . Отсюда современные исследования в этой области должны быть нацелены на возможную разработку достаточно простых с позиций инженерной практики математических моделей полимерно-композиционного материала в состоянии переработки.

Характерной тенденцией современного этапа механики полимерных композитных материалов является смещение центра исследований в область технологических задач и формирование на основе их решения нового раздела – технологической механики. Центральную проблему раздела составляет разработка феноменологических расчетных моделей с учетом эволюции формирования структуры в процессе переработки. Успешное развитие и углубление исследований по всем рассмотренным проблемам является залогом дальнейшего прогресса механики композитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тамуж В.П., Гетерс Г.А. Проблемы механики композитных материалов / В.П.Тамуж, Г.А.Гетерс // Механика композитных материалов. - 1979. - № 1. - С. 34-45.
2. Болотин В.В., Воронцов А.Н., Мурзаханов Г.Х. Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях из композитов на протяжении всего процесса изготовления / В.В.Болотин, А.Н.Воронцов, Г.Х.Мурзаханов // Механика композитных материалов. - 1980. - № 3. - С. 500-508.
3. Томашевский В.Т., Шалыгин В.Н., Яковлев В.С. Прогнозирование технологических дефектов и способы их предотвращения в намоточных армированных полимерах / В.Т.Томашевский, В.Н.Шалыгин, В.С.Яковлев. - В кн. : I Всесоюз.конф.по композиционным полимерным материалам и их применение в народном хозяйстве: Тез.докл. Ташкент. - 1980. - Т.3. - С.40.
4. Томашевский В.Т., Шалыгин В.Н., Яковлев В.С. Моделирование условий возникновения технологических дефектов в структуре намоточных композитных полимерных материалов / В.Т.Томашевский, В.Н.Шалыгин, В.С.Яковлев // Механика композитных материалов. - 1980. - № 5. - С. 895-900.
5. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций / В.В.Болотин, Ю.Н.Новичков. - М. - 1980. - 375 с.
6. Турусов Р. А., Давтян С. П., Шкадинский К. Г., Розенберг Б. Д., Андреевская Г. Д., Ениколопан Н. С. Механические явления в условиях распространения фронта отверждения / Р.А.Турусов, С.П.Давтян, К.Г.Шкадинский, Б.Д.Розенберг, Г.Д.Андреевская, Н.С.Ениколопан // Докл. АН СССР. - 1979. - Т. 247. - № 1. - С. 97-100.
7. Клычников Л. В., Давтян С. П., Худяев С. И., Ениколопан Н. С. О влиянии неоднородного температурного поля на распределение остаточных напряжений при фронтальном отверждении /

Л.В.Клычников, С.П.Давтян, С.И.Худяев, Н.С.Ениколопян // Механика композитных материалов. - 1980. - № 3. - С. 509-513.

8. Розенберг Б. А., Ениколопян Н. С. Проблемы технологической монолитности изделий из композиционных материалов / Б.А.Розенберг, Н.С.Ениколопян // Журн. Всесоюз. хим. об-ва. - 1978. - Т. 23. - № 3. - С. 298-304.

9. Арутюнян Х.А., Давтян С.П., Розенберг Б.А., Ениколопян Н.С. Отверждение эпоксидианового олигомера ЭД-5 аминами в режиме распространения фронта реакции / Х.А.Арутюнян, С.П.Давтян, В.Н.Шалыгин // Докл. АН СССР. - 1975. - Т.223. - № 3. - С. 657-660.

10. Томашевский В.Т., Наумов В.Н., Шалыгин В.Н. Влияние неоднородности охлаждения на технологические температурные напряжения в толстостенных цилиндрических оболочках из армированных полимеров / В.Т.Томашевский, В.Н.Наумов, В.Н.Шалыгин. - В кн.: Полимерные материалы в машиностроении. - Пермь. - 1977. - С. 10-17.

11. Огилько Т.Ф. Метод расчёта макроскопических усадочных напряжений в цилиндрических оболочках из стеклопластиков с учётом некоторых технологических факторов / Т.Ф.Огилько // - Механика полимеров. - 1974. - № 5. - С. 823-827.

12. Бахарев С.П., Миркин М.А. К вопросу о температурных напряжениях, возникающих в процессе термообработки цилиндрических оболочек из стеклопластиков / С.П.Бахарев, М.А.Миркин // - Механика полимеров. - 1978. - № 6. - С. 1118-1121.

13. Екельчик В.С., Никифорова Е.В. Неоднородное нестационарное температурное поле и температурные напряжения в ортотропном вязкоупругом цилиндре / В.С.Екельчик, Е.В.Никифорова // XIV науч.совещ. по тепловым напряжениям в элементах констр-ций (Канев, 1977). Тез.докл. Киев. - 1977. - С.42-43.

14. Сборовский А.К., Бугаков И.И., Екельчик В.С., Кострицкий С.Н. Технологические напряжения в конструкциях из стеклопластика при отверждении в неоднородном температурном поле / А.К.Сборовский, И.И.Бугаков, В.С.Екельчик, С.Н.Кострицкий. - В кн.: Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля. - 1974. - Вып. 3. - С.17-21.

15. Тарнопольский Ю.М., Розе А.В. Особенности расчета деталей из армированных пластиков / Ю.М.Тарнопольский, А.В.Розе. - Рига. - 1969. - 274 с.

16. Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г. Программированная намотка стеклопластиков / Ю.М.Тарнопольский, Г.Г.Портнов // Механика полимеров. - 1970. - № 1. - С. 48-53.

17. Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г., Спридзанс Ю.Б. Компенсация температурных напряжений в изделиях из стеклопластиков методом послойной намотки / Ю.М.Тарнопольский, Г.Г.Портнов, Ю.Б.Спридзанс // Механика полимеров. - 1972. - № 4. - С. 640-645.

18. Благоняев В.О., Перевозчиков В.Г. Остаточные напряжения в кольцах из стеклопластиков, полученных методом послойного отверждения / В.О.Благоняев, В.Г.Перевозчиков // Механика полимеров. - 1972. - № 1. - С. 174-176.

19. Шалыгин В.Н. Совмещенный технологический процесс производства резино-стеклопластиковых узлов / В.Н.Шалыгин. - В кн.: Стеклопластики в машиностроении. Л. - 1971. - С. 28-30.

20. Работнов Ю.Н., Екельчик В.С. Об одном способе предотвращения трещин при термообработке толстостенных оболочек из стеклопластика / Ю.М.Работнов, В.С.Екельчик // Механика полимеров. - 1975. - № 6. - С. 1095-1098.

21. Варушкин Е.М. Исследование температурных остаточных напряжений и деформаций в толстостенных намоточных изделиях из армированных пластиков / Е.М.Варушкин // Механика полимеров. - 1971. - № 6. - С. 1040-1046.

22. Огилько Т.Ф. Влияние режима охлаждения на усадочные напряжения в цилиндрических оболочках из стеклопластиков / Т.Ф.Огилько // Механика полимеров. - 1974. - № 5. - С.949-951.

23. Афанасьев Ю.А., Екельчик В.С., Иванов В.К. Регулирование остаточных напряжений в толстостенных ортотропных цилиндрических изделиях/ Ю.А.Афанасьев, В.С.Екельчик, В.К.Иванов. - Всесоюз.науч.-техн. симпоз. «Новые полимерные композиционные материалы в машиностроении» (Черкассы, 1978). Тез.докл. - М. - 1978. - С.25-29.

24. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Гетерс Г.А. Сопrotивление жестких полимерных материалов. Изд.2-е / А.К.Малмейстер, В.П.Тамуж, Г.А.Гетерс. - Рига. - 1972. - 498 с.

25. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов / Б.Е.Победря. - М. - 1984. - 336 с.

26. Победря Б.Е. О вычислительной механике деформируемого твердого тела / Б.Е.Победря // Математические методы механики деформируемого твердого тела. - М. - 1986. - С. 124-129.

27. Болотин В.В., Болотина К.С. Расчет остаточных напряжений и деформаций в намоточных изделиях из армированных пластиков / В.В.Болотин, К.С.Болотина // Механика полимеров. - 1969. - № 1. - С. 134-139.

28. Екельчик В.С., Никифоров Е.В. Нестационарные температурные напряжения в ортотропном вязкоупругом цилиндре из композиционного полимерного материала / В.С.Екельчик, Е.В.Никифоров // Вопросы судостроения. Сер. Технология судостроения. – 1978. – Вып.18. – С.139-145.
29. Болотин В.В., Воронцов А.Н. Образование остаточных напряжений в изделиях из слоистых и волокнистых композитов в процессе отверждения / В.В.Болотин А.Н.Воронцов / Механика полимеров. – 1976. - № 5. – С. 790-795.
30. Ien Chen I., Bogue D.C. Time-dependent stress in polymer melts and reviewof viscoelastic theory / Ien Chen I., D.C. Bogue // Trans. Soc. Rheol. – 1972. – Vol. 16, № 1. – P. 59-78.
31. Bird R.B., Carrean P.I. A nonlinear viscoelastic model for polymer solution and melts.2 / R.B. Bird., P.I. Carrean // Chem. Eng. Sci. – 1968. – Vol.23. – P. 427-434.
32. Carrean P.I., McDonald I.E., Bird R.B. A nonlinear viscoelastic model for polymer solution melts.2 / P.I. Carrean, I.E. McDonald, R.B. Bird // Chem. Eng. Sci. – 1968. – Vol.23. – P. 901-911.
33. Томашевский В.Т., Шалыгин В.Н., Яковлев В.С. Моделирование условий возникновения технологических дефектов в структуре намоточных композитных полимерных материалов / В.Т.Томашевский, В.Н.Шалыгин, В.С.Яковлев // Механика композит. материалов. – 1980. – № 5. – С. 895-900.
34. Александров А.П., Лазуркин Ю.С. Высокоэластическая деформация полимеров / А.П.Александров, Ю.С.Лазуркин // Журн.техн.физики. – 1939. – Т.9, вып.14. – С. 1249-1261.
35. Москвитин В.В., Вайндинер А.И., Соломатин Л.А. О полимеризационных напряжениях в линейных вязкоупругих средах / В.В.Москвитин, А.И.Вайндинер, Л.А.Соломатин // Механика полимеров. – 1968. – № 4. – С. 716-723.
36. Коротков В.Н., Турусов Р.А., Андреевская Г.Д., Розенберг Б.А. Температурные напряжения в полимерных и композитных материалах / В.Н.Коротков, Р.А.Турусов, Г.Д.Андреевская, Б.А.Розенберг // Механика композитных материалов. – 1980. – № 5. – С. 828-834.
37. Болотин В.В., Воронцов А.Н., Мурзаханов Р.Х. Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях из композитов на протяжении всего процесса изготовления / В.В.Болотин, А.Н.Воронцов, Р.Х.Мурзаханов // Механика композитных материалов. – 1980. – № 3. – С. 500-508.
38. Гольденблат И.И. Некоторые вопросы теории упругих и пластических деформаций / И.И.Гольденблат. – М. – 1950. –482 с.

УДК 658. 512

Василевич Ю.В., Каштальян Е.И.

**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МОДУЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Рассмотрена задача повышения эксплуатационных характеристик модульных инструментальных систем (МИС) металлорежущего оборудования с числовым программным управлением. Показано, что в качестве критериев для оценки эксплуатационных характеристик МИС целесообразно использовать контактную жесткость и максимальное перемещение в точке приложения нагрузки. Приведена методика оценки контактной жесткости сопряжений соединительных элементов с поверхностями двойного базирования. Выявлены закономерности влияния параметров качества поверхности, сопрягаемых элементов МИС на контактную податливость в стыках соединительных элементов.

Составной частью технологической оснастки металлорежущего оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) являются модульные инструментальные системы (МИС). Их применение характерно для многоцелевых станков типа «Обрабатывающий центр», что обусловлено широкой номенклатурой используемых на них режущих и вспомогательных инструментов, и разнообразием их присоединительных поверхностей. При изготовлении корпусных деталей сложной конфигурации на многоцелевых станках стоимость инструментальной системы иногда достигает 30—40% стоимости самого оборудования. Одним из способов ее снижения является унификация вспомогательного инструмента. Чаще она сводится к разделению вспомогательного инструмента на элементы (модули), соединяемые