

УДК 621.931

**В.И. Малыгин, Н.В. Лобанов, Л.В. Кремлева**

Малыгин Владимир Иванович родился в 1952 г., окончил в 1979 г. Университет Дружбы народов им. П. Лумумбы, доктор технических наук, профессор, действительный член АИИ РФ, проректор по научной работе Филиала «Севмашвтуз» СПбГМТУ. Имеет более 150 научных работ в области математического моделирования физических процессов при резании.



Лобанов Николай Владимирович родился в 1966 г., окончил в 1988 г. Севмашвтуз, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортного и технологического оборудования Филиала «Севмашвтуз» СПбГМТУ. Имеет более 15 научных работ в области математического моделирования физических процессов при резании, прикладной механики и лесопильного оборудования.



## **МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ ФРЕЗ ПРИ СТЕНДОВОМ И МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ.**

### **1. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ СБОРНОГО ИНСТРУМЕНТА**

#### **ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ И МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ\***

Намечены пути практической реализации обеспечения эффективности качества сборных дереворезающих фрез на стадии проектирования технологического процесса.

*Ключевые слова:* деревообработка, сборные фрезы, физическая и математическая модель, оптимизация, надежность, качество обработки.

Эффективность технологических процессов механической обработки древесины, например, в мебельном производстве, использующем элементы гибкой автоматизации, с позиций выбора режущего инструмента (прежде всего фрез) определяется специфичностью самого производства. Для древесных материалов спецификой является анизотропия свойств, связанная с волокнистой структурой, а также с наличием локальных включений (сучки), физико-механические свойства которых резко отличаются от остального материала. Используемые в производстве мебели другие материалы, главным образом древесностружечные плиты, также имеют свои особенности при обработке.

С позиций обеспечения надежности инструмента и качества выпускаемой продукции перечисленные факторы свидетельствуют о необходимости

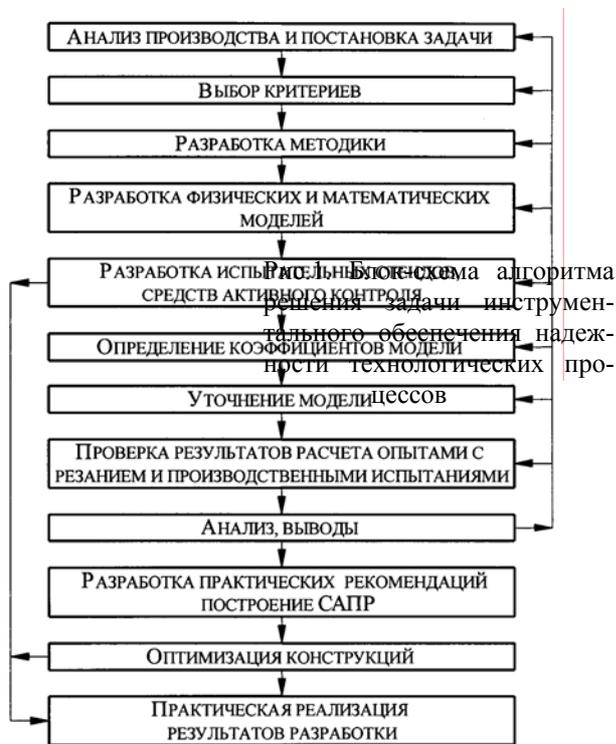
---

\* Работа подготовлена по результатам исследований, выполняемых по гранту Министерства образования РФ «Разработка научных основ создания расчетных и экспериментальных неразрушающих экспрес-методов оценки качества сборного инструмента» (шифр 97-24-9.5-520).

сти установления законов протекания процессов при резании и создания на их основе физических и математических моделей. Отсутствие в настоящее время единой оптимизационной экономической модели свидетельствует о том, что при оптимизации процесса механической обработки выбор целевой функции и ограничений на ее параметры не может быть единым и в каждом конкретном случае будет определяться или требованиями к качеству обработанной поверхности, или производительностью, или периодом стойкости, или ресурсом инструмента.

Очевидно, что решение вопросов обеспечения точности, инструментального обеспечения эффективности и надежности технологических процессов механической обработки должно решаться на всех этапах от проектирования до эксплуатации. Причем, если вопросы точности инструмента решаемы, то вопросы надежности вызывают наибольшие затруднения. Обусловлено это тем обстоятельством, что классические критерии математической теории надежности – ресурс и стойкость (ОСТ2-Н06-23–82), применяемые для оценки инструмента, – предполагают проведение опытов с резанием, статистическую обработку результатов экспериментов, т.е. требуют значительных затрат времени и средств. Поэтому, кроме данных критериев, необходимы и другие, например концепция надежности сложных систем [15]. В какой-то мере в машиностроении находят применение некоторые из них: концепция ускоренных испытаний, которая имеет ряд недостатков (отличных от реальных условия резания), не исключает на стадии поиска оптимальных решений трудоемкого метода проб и ошибок; диагностика и контроль, позволяющие оценивать надежность по таким косвенным показателям, как жесткость, спектральные характеристики, температура нагрева, восстанавливаемость. Необходимо признать, что данные концепции развиваются и внедряются в производство недостаточно оперативно по причинам, приведенным ниже.

На этапе проектирования трудности объясняются отсутствием единой комплексной модели, учитывающей влияние всех составляющих процесса резания, и однозначной связи между этими отдельными составляющими и критериями надежности. Кроме того, модель должна учитывать



влияние самой технологической системы, допущения о независимости работоспособности инструмента от свойств которой, принимавшиеся некоторыми видными специалистами ранее, являются несостоятельными, о чем свидетельствует практика. Причем с понижением жесткости технологической системы стойкость инструмента из хрупких материалов (композитов) может уменьшиться до пяти раз. Существующие в настоящее время представления о станке, как о системе энергетически замкнутой, также ошибочны, так как процесс резания характеризуется изменением массы, связанным с износом инструмента, а также рассеянием тепловой энергии в пространстве за счет конвекции, нагрева и удаления стружки. Поэтому создание модели в рамках единой энергетической теории и практические задачи инструментального обеспечения надежности технологических процессов требуют немедленного решения. В этих условиях поставленные задачи можно решать поэтапно, путем усложнения и развития моделей в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1 [8].

На первый взгляд, в качестве исходной можно принять динамическую модель, связывающую отдельные элементы технологической системы и оценивающую их надежность по статической и динамической жесткостям, импедансу, адмитансу или другим характеристикам (рис. 2) с помощью установленных зависимостей [12].

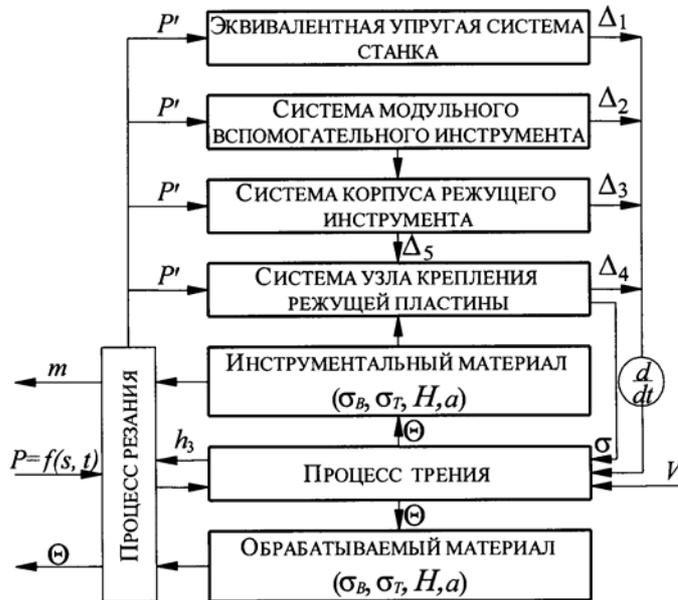
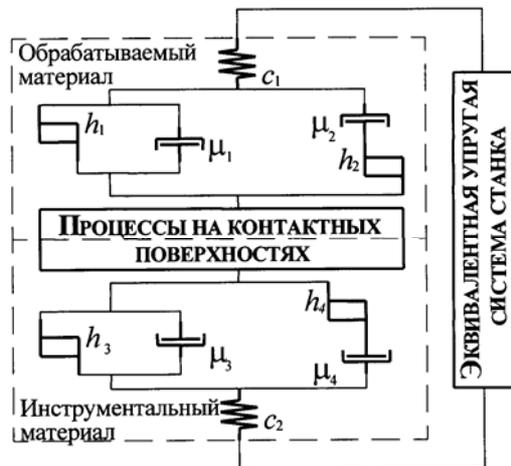


Рис. 2. Динамическая модель технологической системы (ТС):  $V, S, t$  – режимы резания;  $\sigma_v, \sigma_t, H, a$  – механические характеристики инструментального и обрабатываемого материалов;  $\Delta_i$  – упругие деформации ТС;  $m, \Theta$  – масса и теплота стружки;  $P$  и  $P'$  – расчетная и действительная силы резания;  $\sigma$  – напряжение

Рис 3. Реологическая стойкостная модель режущего инструмента:  $h_i$  – коэффициент сухого трения;  $\mu_i$  – коэффициент вязкого трения;  $c_i$  – коэффициент статической жесткости



И если для модульного вспомогательного инструмента эти характеристики без сомнения являются определяющими, то, как показывают исследования, для подсистемы сборного режущего инструмента однозначного ответа нет, в связи с чем не исключены ошибочные решения при выборе конструкции. Большую достоверность может дать реологическая модель процесса резания (рис. 3), позволяющая оценивать инструмент через уста-

новленную зависимость стойкости от отношения, во-первых, механических характеристик инструментального и обрабатываемого материалов и, во-вторых, пределов прочности и текучести инструментального материала и напряжений в режущей пластине [11]:

$$T = C_T (\sigma_b / \sigma)^x (\sigma_T / \sigma)^y (H_n / H_0)^z (a_n / a_0)^q (K_1 K_2 \dots K_n),$$

где

$T$  – период стойкости инструмента;

$C_T$  – коэффициент резания;

$\sigma_b, \sigma_T$  – предел соответственно прочности и текучести инструментального материала;

$\sigma$  – напряжения в режущей пластине;

$H_n$  и  $H_0$  – твердость соответственно инструментального и обрабатываемого материалов;

$a_n$  и  $a_0$  – ударная вязкость соответственно инструментального и обрабатываемого материалов;

$K_1, K_2, \dots, K_n$  – коэффициенты, учитывающие влияние условий резания.

Наибольшие трудности возникают при определении механических характеристик материалов при данной температуре нагрева, соответствующей заданному режиму резания. Для этого необходимо иметь накопленные результаты эксперимента, что также требует проведения фундаментальных исследований, связанных с большими затратами времени. Поэтому первоначально для оценки качества инструмента возможно использование моделей деформационной точности, напряженного состояния режущей пластины [1, 6, 7, 9], а для повышения вероятности результатов оценки – другие известные модели: статическую [3], динамическую [4, 14], теплофизическую [10]. Альтернативой реологической может быть более сложная триботехническая модель, позволяющая также прогнозировать период стойкости инструмента:

$$T = \frac{h_3 \cos \gamma \sin \alpha / \cos(\alpha + \gamma)}{C (P_a \theta / K_v)^{1+\beta t} \Delta^{1-\beta} (K_f / \sigma_0 \theta)^t (\eta_{ca})^{-\beta t} V},$$

где  $h_3$  – ширина ленточки износа по задней поверхности;

$\gamma, \alpha$  – передний и задний угол резания;

$$C = v^{0.5} \Gamma(v) \Gamma(1 + t/2) [4(v + 1) \Gamma(v) + t/2]^{-1};$$

$v$  – параметр степенной аппроксимации начального участка опорной кривой;

$\Gamma$  – гамма-функция;

$t, \sigma_0$  – параметры фрикционной усталости материала;

$P_a$  – номинальное давление;

$\theta$  – постоянная упругость инструментального материала,

$$\theta = (1 - \mu^2)/E;$$

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости;

$K_v$  – коэффициент, учитывающий влияние температурного фактора;

$$\beta = 1/(2v + 1);$$

$$K_f = 2(4f^2(1 - \mu + \mu^2) + (1 - 2\mu)^{0,5}) / \pi \text{ при } \sigma_B^p \approx \sigma_B^c;$$

$$K_f = 4f(1 + \mu^2) / \pi \text{ при } \sigma_B^p \approx \sigma_B^c \ll 1;$$

$f$  – коэффициент трения;

$\sigma_B^p, \sigma_B^c$  – пределы прочности материала при растяжении и сжатии;

$\eta_{ca}$  – коэффициент, учитывающий несоответствие между контурной  $A_c$  и номинальной  $A_a$  площадями контакта,  $\eta_{ca} = A_c/A_a$ ;

$V$  – скорость резания.

Трудности, возникающие при разработке такой модели, аналогичны перечисленным выше. Проблемой является определение показателей механических свойств поверхностей, которые значительно отличаются от полученных при испытаниях образцов. Возможен переход к интегральной оценке качества инструмента. В настоящее время перечисленные модели можно рассматривать как основу САПР режущего инструмента, построенную по модульному принципу [13]. Это позволит по мере развития единой модели непрерывно ее усложнять за счет введения новых модулей без перестройки структуры, а также использовать отдельные ее элементы для решения частных задач.

На этапе изготовления и эксплуатации инструмента решение поставленной задачи может быть осуществлено через разработку диагностических испытательных стендов активного контроля [2, 5]. При создании стендов должны быть использованы те же принципы, а критериями должны служить те же оценки, которые заложены в расчетные математические модели. Такие стенды на стадии изготовления инструмента служат в качестве средства входного контроля надежности, а на стадии эксплуатации – в качестве средства входного контроля. В обоих случаях стенды позволяют контролировать качество изготовления отдельных элементов и сборки инструмента в целом, вскрывать причины брака, по известным стойкостным зависимостям корректировать скорость резания для обеспечения заданного периода стойкости, вести селективный отбор инструмента в партии. Подобные стендовые испытания относятся к активным методам контроля и, как показывает опыт, достаточно эффективны с точки зрения оценки качества конструкции инструмента, но они не позволяют выявить скрытые дефекты самой режущей пластины. Кроме того, резание – процесс во многом случайный, что связано, например, с неравномерностью структуры, а следовательно, и свойств обрабатываемых материалов из-за различного рода включений. Поэтому полное решение вопроса инструментального обеспечения надежности технологических процессов механической обработки невозможно без использования средств контроля состояния режущей кромки инструмента в процессе резания. Необходимы также экспресс-методы установления оптимального режима резания, действие которых основано на определенных физических характеристиках процесса резания (силовые, вибрационные, акустическая эмиссия, температура, градиент термо-ЭДС [5]).



зубе, обусловленная настройкой системы;  
 $a_{dk}$  – действительная толщина реза на  $k$ -м зубе;  
 $\Delta_{\text{деф}}$  – изменение толщины реза в результате деформации под воздействием силы резания;  
 $\Delta_{\text{сл}}$  – то же в результате прохода предыдущего зуба («след»)

колебания в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Эквивалентные упругие системы (ЭУС) заготовки и инструмента характеризуются приведенными к зоне резания массами  $m$ , обобщенными коэффициентами сопротивления (демпфирования)  $\lambda$  и жесткости  $k$ , в общем случае различными по трем координатным направлениям. Система является замкнутой. Эта замкнутость определяется взаимодействием ЭУС заготовки и инструмента с процессом резания, причем многоконтурность системы обусловлена участием в работе нескольких зубьев фрезы. Обе ЭУС взаимодействуют друг с другом через процесс резания, действие которого заменено суммарными составляющими силы резания  $\left( \sum_{i=1}^{N_p} F_{Z_i}; \sum_{i=1}^{N_p} F_{Y_i}; \sum_{i=1}^{N_p} F_{X_i} \right)$ , которые являются ре-

зультатом работы зубьев, участвующих в резании в данный момент времени (число  $N_p$  является переменным в силу неравномерности фрезерования).

Данные силы, действующие на режущие зубья, получены путем приведения к неподвижной системе координат  $OXYZ$  сил из системы координат, связанной с вращающейся фрезой:  $F_{t1}, F_{t2}, \dots, F_{tN}$  – тангенциальные составляющие на  $k$ -м зубе;  $F_{r1}, F_{r2}, \dots, F_{rN}$  – радиальные составляющие на  $k$ -м зубе;  $F_{o1}, F_{o2}, \dots, F_{oN}$  – осевые составляющие на  $k$ -м зубе.

Составляющие силы резания в подвижной системе координат – результат сопротивления материала резанию – зависят от площади действительного сечения срезаемого слоя и являются функциями времени:

$S_1(t), S_2(t), \dots, S_N(t)$ .

Действительное сечение срезаемого слоя является произведением действительной толщины  $\bar{a}_1(t), \bar{a}_2(t), \dots, \bar{a}_N(t)$  на действительную ширину срезаемого слоя  $\bar{b}_1(t), \bar{b}_2(t), \dots, \bar{b}_N(t)$ .

Действительные толщина и ширина сечения среза на  $k$ -м работающем зубе определяются настройкой системы на заданную (кинематическую) толщину и ширину сечения среза, а также ее изменением в результате взаимных деформаций системы под влиянием всех работающих зубьев и «следа» обработки от прохода предыдущего зуба.

Расчет происходит следующим образом. На начальном этапе на основе анализа геометрических характеристик обрабатываемой поверхности решают вопрос о выборе схемы ее формообразования: определение производящей поверхности инструмента и движений подачи. С учетом ограничений, налагаемых станком, строят функцию формообразования. На основе анализа огибающих поверхностей резания получают ответ на вопрос о при-

емлемости выбранной схемы резания условиям точности, предъявляемым к профилю поверхности.

Для выбранной производящей поверхности инструмента определяют конструктивные характеристики инструмента (число зубьев, геометрия и др.). С учетом выбранных конструктивных характеристик инструмента, схемы его работы (главное движение и движение подачи) на основании геометрической информации о заготовке производят расчет мгновенных характеристик сечения срезаемого слоя (толщина и ширина), а затем пошаговое формирование вектор-функций сил резания.

Следующий этап расчета – генерирование информации о полях податливости элементов технологической системы (ТС), непосредственно примыкающих к зоне резания, их диссипативных и инерционных характеристиках. Осуществляют расчет статических и динамических отклонений характеристик сечения снимаемого слоя при выбранной схеме обработки и конструктивных параметрах инструмента. Воспроизводят действительные поверхности резания с учетом упругости элементов ТС и их огибающих для оценки формы и размеров обрабатываемой поверхности, оценивают погрешность и принимают решение о необходимости ее компенсации. В случае необходимости выполняют коррекцию параметров или самой функции формообразования.

При заданной кинематике нахождение оптимальных вида, типа и конструкции инструмента, наряду с управлением схемой срезания припуска, позволяет оптимизировать распределение деформаций при обработке, обеспечивает точность формообразования и производительность обработки.

В соответствии с традиционной теорией формообразования в данной модели использован математический аппарат, основанный на применении параметрических матричных преобразований. В качестве основного параметра выбрано время. Предусмотрен также анализ динамических характеристик процесса в частотной области.

#### *Выводы*

1. Предложенный подход позволяет на этапе технологического проектирования сформировать требования к конструкции режущего инструмента, схемам его работы и проектированию (в том числе и в автоматизированном режиме) технологической операции обработки резанием древесных материалов, что обеспечивает повышение точности и производительности при существующих технологических ограничениях.

2. Полное решение вопроса инструментального обеспечения надежности, производительности и точности технологических процессов механической обработки как в деревообработке, так и в других отраслях возможно лишь при комплексном подходе и определяется прежде всего развитием физических моделей процессов, происходящих в зоне резания и протекающих непосредственно в режущем инструменте.

3. Оценка надежности и точности обработки должна осуществляться как по прямым (стойкость, ресурс, прочность), так и по косвенным критери-

ям (напряженно-деформированное состояние, статическая жесткость, динамические характеристики (податливость, импеданс, адмитанс, уровень спектральных характеристик), отношение механических характеристик инструментального и обрабатываемого материалов при заданной температуре резания), а также по другим критериям, имеющим корреляционные зависимости с прямыми показателями надежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гречишников, В.А.* Оценка динамической точности настройки сборного инструмента на стадии проектирования [Текст] / В.А. Гречишников, В.И. Малыгин, П.В. Перфильев // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 24–27.
2. *Малыгин, В.И.* Диагностические методы обеспечения надежности составного инструмента для ГАП [Текст] / В.И. Малыгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1993. – № 1. – С. 110–116.
3. *Малыгин, В.И.* Математическая модель сборной торцевой фрезы [Текст] / В.И. Малыгин, В.В. Матвейкин, Г. Манавендра, В.В. Копылов // Вопросы повышения жесткости и точности технологического оборудования и режущего инструмента. – М.: УДН, 1986. – С. 16–20.
4. *Малыгин, В.И.* Методика расчета динамических параметров процесса фрезерования древесины с учетом кинематической нестабильности технологической системы [Текст] / В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева // Лесн. журн. – 2002. – № 1. – С. 95–103. – (Изв. высш. учеб. заведений).
5. *Малыгин, В.И.* Методы и технические средства комплексной диагностики инструмента и оптимального режима резания [Текст] / В.И. Малыгин. – М.: МГТУ «Станкин», 1994. – 40 с.
6. *Малыгин, В.И.* Модель напряженного состояния сборного дереворежущего инструмента для оценки его качества на стадии проектирования [Текст] / В.И. Малыгин, Н.В. Лобанов // Лесн. журн. – 2001. – № 4. – С. 58–64. – (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Малыгин, В.И.* Модель напряженно-деформированного состояния режущего элемента сборного инструмента [Текст] / В.И. Малыгин, Н.В. Лобанов // Вестник машиностроения. – 2000. – № 2. – С. 22–26.
8. *Малыгин, В.И.* Оптимизация конструкций инструмента для ГАП методами математического моделирования физических процессов при резании [Текст]: сб. тр. АИН РФ / В.И. Малыгин. – СПб., 2001. – С.175–185.
9. *Малыгин, В.И.* Расчетный метод оценки качества сборного инструмента по напряженному состоянию [Текст] / В.И. Малыгин, П.В. Перфильев // Вестник машиностроения. – 1992. – № 9. – С. 44–46.
10. *Малыгин, В.И.* Резервы повышения эффективности сборного режущего инструмента и пути их использования [Текст] / В.И. Малыгин, Н.Р. Варгасов, О.Д. Мюллер, П.В. Перфильев // Технология судостроения. – 1990. – № 1. – С. 30–32.
11. *Малыгин, В.И.* Реологическая стойкостная модель сборного режущего инструмента [Текст] / В.И. Малыгин, Н.Р. Варгасов, О.Д. Мюллер // Применение физикохимических методов исследования в науке и технике: тез. докл. III научно-техн. конф. – М.: УДН, 1990. – С. 208.
12. *Малыгин, В.И.* Связь работоспособности сборного режущего инструмента с его спектральными характеристиками [Текст] / В.И. Малыгин, А.Д. Шустри-

ков // Совершенствование конструкций и процессов изготовления режущего и измерительного инструментов и технологической оснастки: сб. докл. МНТК. – Киров, 1988. – С. 22–23.

13. *Мальгин, В.И.* Структурное построение САПР инструмента гибкого автоматизированного производства [Текст] / В.И. Мальгин, С.Е. Евстигнеев // Применение физикохимических методов исследования в науке и технике: тез. докл. II научно-техн. конф. – М.: УДН, 1986. – С. 234.

14. *Подураев, В.Н.* Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической неустойчивости процесса резания [Текст] / В.Н. Подураев, В.И. Мальгин, Л.В. Кремлева // Вестник машиностроения. – 1996. – № 6. – С. 18–23.

15. *Чинаев И.П.* Концепции надежности [Текст]: материалы научно-техн. конф., посвященной 25-летию кафедры технологии машиностроения / И.П. Чинаев. – М.: УДН, 1988. – С. 3–8.

Поступила 11.05.06

Филиал «Севмашвуз» СПбГМТУ

*V.I. Malygin, N.V. Lobanov, L.V. Kremleva*

**Methods of Optimization and Quality Rating of Wood Cutters under Bench and Mathematical Simulation. 1. Algorithm of Problem Solution on Optimization of Assembled Tool Structure under Physical and Mathematical Modeling**

Ways of practical realization of providing quality efficiency for assembled wood cutters are set at the stage of designing technological process.

---