

**Е. В. Сидорова**, канд. техн. наук, доц.

Донецкий национальный технический университет, Донецкая Народная Республика

Тел.: +38 (062) 301 08 05; E-mail: [sydorova@gmail.com](mailto:sydorova@gmail.com)

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МАКСИМАЛЬНЫЙ РЕСУРС РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Разработана модель для определения условий обработки резанием, обеспечивающих максимальный ресурс режущего инструмента, основанная на моделировании термомеханического состояния материала и режущего инструмента, эмпирических зависимостях, описывающих стойкость режущего инструмента, и расчётном оптимизационном модуле. Модель состоит из модуля входных данных, описывающего начальные условия обработки, модуля моделирования, реализуемого в программной среде ABAQUS Explicit, использующей метод конечных элементов, для получения данных о термомеханическом состоянии обрабатываемого материала и режущего инструмента, и модуля выходных данных, реализуемого в программной среде MathCAD для выполнения оптимизационных расчётов. Эффективность применения модели продемонстрирована на примере точения стали ШХ15 твердосплавной режущей пластиной с TiAlN-покрытием.*

**Ключевые слова:** обработка резанием, термомеханическое нагружение, ресурс режущего инструмента, режим резания, СОТС, сталь ШХ15.

**E. V. Sydorova**

## DEVELOPMENT OF A MODEL TO DETERMINE THE CUTTING CONDITIONS, ENSURING THE MAXIMUM WORKING TOOL LIFE

*The model is developed to determine the cutting conditions, ensuring the maximum working tool life, based on the modelling of thermomechanical behaviour of the work material and the cutting tool, the empirical dependencies describing the tool life and the calculated optimization module. The model consists of the module of input data describing initial conditions of cutting, the modelling module implemented in the software environment ABAQUS Explicit, using finite element method, to obtain data of thermomechanical behaviour of the work material and the cutting tool, and the output module, implemented in software environment MathCAD to perform optimization calculations. The effectiveness of the model is demonstrated on the example of 100Cr6 steel turning by the carbide insert with TiAlN coating.*

**Keys words:** cutting, thermomechanical loading, working insert life, cutting conditions, cutting fluids, 100Cr6.

### 1. Введение

Определение условий обработки резанием, обеспечивающих максимальный ресурс режущего инструмента, является актуальной задачей при черновой обработке материалов резанием. Решение данного вопроса экспериментальным методом требует значительных материальных и временных затрат.

Получившие в настоящее время широкое распространение методы термомеханического моделирования [1-3] позволяют решать многие задачи, связанные с оптимизацией процессов резания, значительно сокращая таким образом вышеупомянутые затраты, однако полностью не исключают части экспериментальных исследований, а для выполнения оптимизационных задач требуются специальные расчётные модули. Поэтому существует необходимость в комплексном подходе при решении таких задач.

Таким образом, целью данного исследования является разработка модели для определения условий обработки резанием, обеспечивающих максимальный ресурс режущего инструмента, основанной на моделировании термомеханического состояния

материала и режущего инструмента, эмпирических зависимостях, описывающих стойкость режущего инструмента, и расчётном оптимизационном модуле. Для этого следует решить следующие задачи:

- разработать модуль входных данных;
- разработать модуль термомеханического моделирования;
- разработать оптимизационный модуль выходных данных;
- проанализировать эффективность применения модели на примере точения стали ШХ15 твердосплавной режущей пластиной с  $TiAlN$ -покрытием.

## **2. Модель для определения условий обработки резанием, обеспечивающих максимальный ресурс режущего инструмента**

Модель для определения условий обработки резанием, обеспечивающих максимальный ресурс режущего инструмента, представлена на рисунке 1 и состоит из модуля входных данных, описывающего начальные условия обработки, модуля моделирования, реализуемого в программной среде *ABAQUS Explicit*, использующей метод конечных элементов, для получения данных о термомеханическом состоянии обрабатываемого материала и режущего инструмента, и модуля выходных данных, реализуемого в программной среде *MathCAD* для выполнения оптимизационных расчётов.

В модуль входных данных вносятся:

- физико-механические свойства обрабатываемого материала и режущего инструмента;
- коэффициенты закона Джонсона-Кука, описывающего поведение материала при больших деформациях;
- геометрические параметры и коэффициенты регрессионного уравнения, описывающего стойкость режущего инструмента;
- значения параметров трибологического и теплового взаимодействия контактирующих поверхностей.

Режим резания выбирается из матрицы рассматриваемой области режимов резания (скорость резания  $v$ , подача  $s$ , глубина резания  $t$ ), а сочетание действий СОТС - из матрицы рассматриваемой области смазывающих и охлаждающих действий СОТС.

Моделирование смазывающего действия СОТС выполняется посредством введения в модель среднего коэффициента трения  $\mu$ , а охлаждающего действия СОТС - посредством введения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Расчёты выполняются для всех комбинаций значений матриц.

В модуле моделирования при описании поведения материала при больших деформациях соблюдаются следующие основные принципы: принципы соблюдения законов физики, принцип эквивалентности, принцип детерминизма, принцип местного действия, принцип учёта свойств материала и принцип объективности. Закон наклёпа материала при больших деформациях описывается законом Джонсона-Кука. Закон контакта между поверхностью режущего инструмента и обрабатываемой поверхностью определяются совокупностью механических и тепловых явлений. Контактные механические явления описываются изотропной моделью трения Кулона. Контактные тепловые явления представляются коэффициентом распределения теплового потока, образующегося на границе контакта обрабатываемого материала и режущего инструмента. Граничные условия задаются на основе Произвольного подхода Лагранжа-Эйлера [1]. Подробная методика термомеханического моделирования представлена в работе [4].

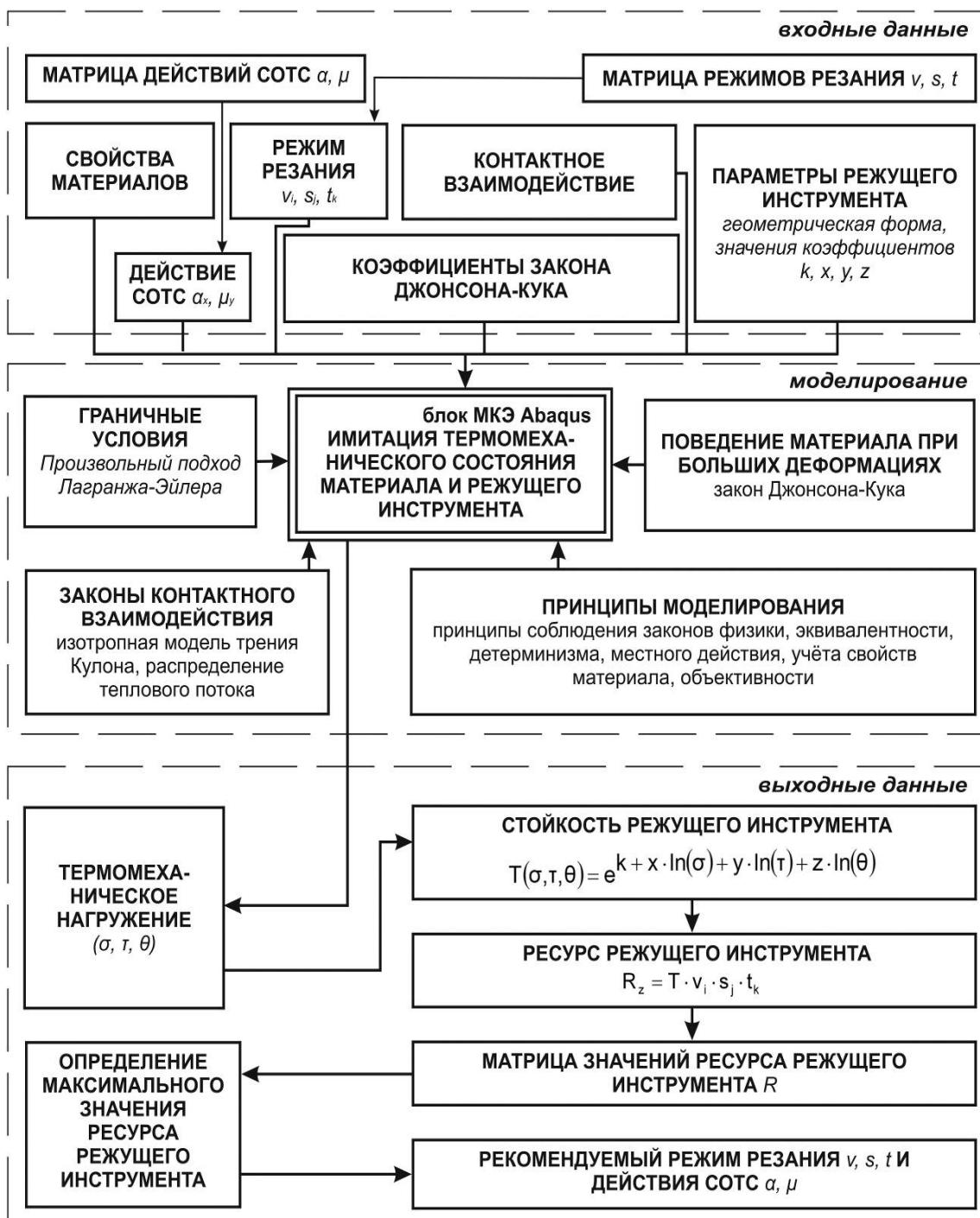


Рис. 1. Модель для определения условий обработки резанием, обеспечивающих максимальный ресурс режущего инструмента

В модуле выходных данных рассчитывается стойкость режущего инструмента на основе регрессионного уравнения зависимости стойкости  $T$  от термомеханических параметров нагружения (контактного нормального напряжения  $\sigma$ , контактного касательного напряжения  $\tau$  и контактной температуры  $\theta$ ), полученного на основании экспериментальных исследований и имитационного моделирования

$$T(\sigma, \tau, \theta) = e^{k+x \cdot \ln(\sigma) + y \cdot \ln(\tau) + z \cdot \ln(\theta)}, \quad (1)$$

где  $k, x, y, z$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Далее для заданных условий обработки  $z$  рассчитывается ресурс режущего инструмента  $R_z$ , который представляет собой объём материала, снимаемый режущим инструментом за его период стойкости

$$R_z = T \cdot v_i \cdot s_j \cdot t_k, \quad (2)$$

Из матрицы значений ресурса режущего инструмента  $R$  для всех рассматриваемых условий обработки определяется максимальное значение ресурса и соответствующий режим резания, а также совокупность смазывающих и охлаждающих действий СОТС.

### 3. Определение условий резания, обеспечивающих максимальный ресурс твердосплавной режущей пластины с $TiAlN$ -покрытием при точении стали ШХ15

Эффективность предложенной модели была проанализирована на примере точения стали ШХ15 твердосплавной режущей пластиной с  $TiAlN$ -покрытием в работе [3].

В программной среде *SIMULIA/Abaqus* была разработана *CAD*-модель режущей пластины и обрабатываемого материала. Физико-механические свойства режущей пластины *ATI Stellram CNMG542A-4E SP0819 CNMG160608E-4E* были заданы на основании [6-8], а обрабатываемого материала (стали ШХ15) - [9].

Закон наклёпа материала при больших деформациях описывается законом Джонсона-Кука. Данный закон устанавливает зависимость напряжения  $\sigma$  от степени деформации  $\varepsilon$ , от скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$ , а также от температуры  $\theta$ , и может быть разложен в мультипликативной форме на три функции [2]

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot \left(1 - \left[\frac{\theta - \theta_0}{\theta_f - \theta_0}\right]^m\right).$$

Первый множитель описывает явление наклёпа, второй – динамические процессы, третий – явления теплового отпуска. Множитель, связанный с наклёпом, соответствует пределу текучести по отношению к скорости деформации.  $A$  – предел текучести, рассматриваемого материала,  $B$  и  $n$  соответственно линейные и нелинейные параметры упрочнения. Второй множитель – масштабный коэффициент, характеризующий динамическое упрочнение материала и зависящий от эквивалентной скорости пластической деформации:  $C$  – коэффициент чувствительности к скорости деформации,  $\dot{\varepsilon}_0$  – начальная скорость деформации. Третий множитель соответствует явлению теплового отпуска ( $\theta$  – температура, по отношению к которой рассматривается механизм теплового отпуска,  $\theta_0$  – начальная температура,  $\theta_f$  – температура плавления,  $m$  – показатель степени теплового отпуска). Коэффициенты данного закона получают посредством проведения испытаний на статическое и динамическое кручение.

Значения параметров закона поведения материала ШХ15 (HRC 45) при больших деформациях Джонсона-Кука представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров закона поведения материала ШХ15 (HRC 45) при больших деформациях Джонсона-Кука [9]

A, МПа	B, МПа	C	n	m	$\varepsilon_0$	$\theta_f$	$\theta_0$
1470	510	0,05	0,2	0,685	1	1487	20

Закон контакта между поверхностью режущей пластины и обрабатываемой поверхностью определяется совокупностью механических и тепловых явлений.

Контактные механические явления опишем изотропной моделью трения Кулона:

$$\begin{aligned} |\sigma_t| &\geq \mu \cdot |\sigma_n|, \\ |\sigma_t| &< \mu \cdot |\sigma_n|, \end{aligned}$$

где  $\sigma_t$ ,  $\sigma_n$  – составляющие вектора контактного напряжения,  $\mu$  – средний коэффициент трения [10].

Средний коэффициент трения для пары *TiAlN/ШХ15* - 0,3.

Контактные тепловые явления представлены коэффициентом распределения теплового потока, образующегося на границе контакта обрабатываемого материала и режущей пластины. В случае динамического контакта проблема усложняется тем, что граница контакта представляет собой источник тепла. Если пренебречь толщиной контакта и накоплением тепла в зоне данного контакта, тогда всё тепло генерируемое на границе контакта  $\Phi_g$  будет разделяться между двумя телами. Введём понятие коэффициента распределения  $\alpha$ , определяющего долю теплового потока  $\Phi_g$  направленного в

тело 1. В нашем случае тело 1 – это режущая пластина, а тело 2 – обрабатываемый материал. В упрощённом случае, где два тела находятся в идеальном контакте, отношение

Вернотта вместе с коэффициентом распределения  $\alpha$  может быть описано в зависимости

от следующего отношения физических характеристик двух материалов [1]

$$\frac{\Phi_{g \rightarrow 1}}{\Phi_{g \rightarrow 2}} = \frac{\alpha}{\alpha - 1} = \frac{\sqrt{\lambda_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1}}}{\sqrt{\lambda_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2}}},$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - коэффициент теплопроводности,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - плотность,  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – удельная теплоёмкость режущей пластины и обрабатываемого материала соответственно.

Коэффициент распределения теплового потока согласно отношению Вернотта для пары *TiAlN/ШХ15* 0,74, из этого следует, что 57% теплового потока на границе контакта обрабатываемого материала и режущей пластины направлено в сторону обрабатываемого материала. Учтём также коэффициент теплопроводности контактной зоны (размер  $h = 1$  мкм) для пары обрабатываемого и инструментального материала  $\alpha_k = 10^8$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Таким образом, была разработана термомеханическая модель процесса резания стали ШХ15 (HRC 45) режущей пластиной *ATI Stellram CNMG542A-4E SP0819 CNMG160608E-4E*. Более подробная методика моделирования представлена в работе [11].

Регрессионное уравнение зависимости стойкости  $T$  от термомеханических параметров нагружения (контактного нормального напряжения  $\sigma$ , контактного касательного напряжения  $\tau$ , контактной температуры  $\theta$ ) для данной режущей пластины [4]

$$T(\sigma, \tau, \theta) = e^{25,06 + 0,01 \cdot \ln(\sigma) - 0,79 \cdot \ln(\tau) - 3 \cdot \ln(\theta)} \quad (1)$$

где  $k, x, y, z$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Первая серия имитационных испытаний была проведена для определения оптимального режима резания, обеспечивающего максимальный ресурс режущей пластины, при точении без применения СОТС. Скорость резания варьировалась в интервале  $v = 100$ -  $200$  м/мин с шагом  $50$  м/мин, подача -  $s = 0,05$ -  $0,15$  мм/об с шагом  $0,05$  мм/об, глубина резания  $t = 1$ -  $3$  мм с шагом  $1$  мм.

Разработанная модель позволила определить режимы резания ( $v = 200$  м/мин,  $s = 0,15$  мм/об,  $t = 2$  мм и  $v = 200$  м/мин,  $s = 0,15$  мм/об,  $t = 3$  мм), обеспечивающие максимальный ресурс режущей пластины  $150 \text{ см}^3$ , что в  $7$  раз больше, чем при режиме резания, который вызвал минимальный ресурс режущей пластины ( $v = 100$  м/мин,  $s = 0,05$  мм/об,  $t = 1$  мм).

Вторая серия имитационных испытаний была проведена для получения оптимальных условий резания, обеспечивающих максимальный ресурс режущей пластины, при точении с применением трёх основных видов СОТС:

- с низкими охлаждающими и высокими смазывающими действиями:  $\alpha = 20 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\mu = 0.15$ ;

- со средними смазывающими и охлаждающими действиями:  $\alpha = 40 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\mu = 0.2$ ;

- с высокими охлаждающими и низкими смазывающими действиями:  $\alpha = 60 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\mu = 0.25$ .

Максимальное значение ресурса режущей пластины  $630 \text{ см}^3$  было получено при режиме резания  $v = 200$  м/мин,  $s = 0,15$  мм/об,  $t = 3$  мм и применением СОТС с низкими охлаждающими и высокими смазывающими действиями или со средними смазывающими и охлаждающими действиями при подаче на переднюю поверхность. Минимальное значение ресурса режущей пластины  $70 \text{ см}^3$  было получено при режиме резания  $v = 200$  м/мин,  $s = 0,05$  мм/об,  $t = 1$  мм и применением СОТС с высокими охлаждающими и низкими смазывающими действиями при подаче на переднюю поверхность. Применение разработанной модели позволило в  $9$  раз увеличить ресурс режущей пластины.

#### 4. Заключение

Была разработана модель для определения условий обработки резанием, обеспечивающих максимальный ресурс режущего инструмента, основанная на моделировании термомеханического состояния материала и режущего инструмента, эмпирических зависимостях, описывающих стойкость режущего инструмента, и расчётном оптимизационном модуле. При точении стали ШХ15 твердосплавной режущей пластины с *TiAlN*-покрытием данная модель позволила определить максимальное значение ресурса режущей пластины  $630 \text{ см}^3$  при режиме резания  $v = 200$  м/мин,  $s = 0,15$  мм/об,  $t = 3$  мм

и применением СОТС с низкими охлаждающими и высокими смазывающими действиями или со средними смазывающими и охлаждающими действиями при подаче на переднюю поверхность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pantale O. Modelisation et simulation tridimensionnelles de la coupe des metaux: these presentee pour obtenir le grade de docteur: mecanique / Pantale Olivier; Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tarbes. – Soutenue 10.07.96. – Tarbes, 1996. – 177 p.
2. Kalay F. Simulation numerique de l'usinage Application a l'aluminium AU4G (A2024-T351) [Электронный ресурс] / F. Kalay // Techniques de l'ingenieur : les bases documentaires techniques et scientifiques. – Режим доступа: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/travail-des-materiaux-assemblage-ti153/simulation-numerique-de-l-usinage-bm7002> - (20.12.2015).
3. Kone F. Etude experimentale, modelisation et simulation numerique de l'usinage a sec des aciers inoxydables : etude de l'effet des revetements mono et multi couches / Kone Fousseny; Universite de Lorraine. – Soutenue 05.10.12. – Saint-Die-des-Vosges, 2012. – 166 p.
4. Sydorova H. Pratique de la modelisation des processus de coupe avec assistance / H. Sydorova // HAL: l'archive ouverte du Centre pour la communication scientifique directe. - 2014.
5. Mikhailov A. Determination of the working insert life in machining 100Cr6 hardened steel with cutting fluids / A. Mikhailov, E. Sydorova, I. Navka // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. – 2015. – Vol.VII. - № 1. – P.42–46.
6. Bouzakis K. D. Ambient and elevated temperature properties of TiN, TiAlN and TiSiN PVD films and their impact on the cutting performance of coated carbide tools / K.-D .Bouzakis, G. Skordaris, S. Gerardis, G. Katirtzoglou, S. Makrimalakis, M. Pappa, E. Lill, R. M'Saoubi // Surface & Coatings Technology. – 2009. - № 204. – P. 1061–1065.
7. Horlinga A. Mechanical properties and machining performance of  $Ti_{1-x}Al_xN$ -coated cutting tools / A. Horlinga, L. Hultmana, M. Oden, J. Sjolen, L. Karlsson // Surface & Coatings Technology. – 2005. – № 191. – P. 384– 392.
8. Characteristics of carbide grade [Электронный ресурс] / Professional grade carbide cutting tools DJET. – Режим доступа: <http://www.dijetusa.com/products/dijet-carbide-grades/cg-carbide-grade-characteristics.pdf> - (20.12.2015).
9. Habak M. Etude de l'influence de la microstructure et des parametres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6: these presentee pour obtenir le grade de docteur: mecanique et materiaux / Habak Malek; ENSAM. – Soutenue 11.12.06. – Angers, 2006. – 191 p.
10. Bacaria J. L. Un modele comportemental et transitoire pour la coupe des metaux: these presentee pour obtenir le grade de docteur: genie mecanique / Bacaria Jean-Louis; Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tarbes. – Soutenue 13.11.01. – Tarbes, 2001. – 232 p.
11. Сидорова Е. В. Разработка термомеханической модели процесса резания стали ШХ15 / Е.В. Сидорова, К.А. Калайда // Инженер: студенческий научно-технический журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – № 1(17)-2(18). – С. 61 – 64.

Поступила в редколлегию 20.01.2016 г.