

УДК 621.9.025

**АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ Ti6Al4V
ИНСТРУМЕНТАМИ С ПОКРЫТИЕМ TiAlN НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-
ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

Михайлов А.Н., Сидорова Е.В., Волохов Д.В. (*ДонНТУ, Донецк, Украина*)

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: sydorova@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлена методика анализа физических процессов при обработке резанием Ti6Al4V инструментами с покрытием TiAlN на основе функционально-ориентированного подхода посредством компьютерного моделирования процесса резания.

Ключевые слова: процесс резания, функционально-ориентированный подход, контактное давление, контактная температура, скорость скольжения стружки.

1. Введение

Получение информации о физических процессах в различных зонах резания экспериментальным путём вызывает сложность из-за малых размеров зоны контакта поверхности режущего инструмента и обрабатываемого материала, большой скорости выполнения процесса, а также постоянного движения и образования стружки.

Разработка теоретической модели процесса обработки резанием решает данную проблему. Компьютерная модель, по отношению к аналитической, имеет преимущество в точности и во времени.

Данная проблема частично решалась в ряде работ [1, 2]. Однако, в них выполнялся общий анализ физических процессов для всей режущей пластины. Сложность процессов происходящих при обработке резанием, многовариантность возможных технологических воздействий, способных повысить эффективность процесса объясняют необходимость применения функционально-ориентированного подхода.

Целью данной статьи является разработка методики для изучения физических процессов при обработке резанием на основе функционально-ориентированного подхода на примере обрабатываемого материала Ti6Al4V и инструментального покрытия TiAlN. Для этого решаются следующие задачи: разрабатывается компьютерная модель процесса резания Ti6Al4V инструментом с покрытием TiAlN, выполняется анализ зоны резания с точки зрения функционально-ориентированного подхода и определяются технологические воздействия для повышения стойкости инструмента.

2. Основное содержание и результаты работы

Среди наиболее распространённых программных продуктов для моделирования процессов резания методом конечных элементов (Abaqus, Advantedge, Deform и др.), ABAQUS представляет интерес с точки зрения открытости программного кода и возможности интегрировать различные законы поведения материалов и их взаимодействий. Таким образом, компьютерное моделирование было реализовано в программном коде ABAQUS Explicit 6.9.2.

Для построения модели необходимо выполнить следующие этапы:

- разработать CAD модель режущего инструмента и обрабатываемой детали;
- внедрить физические параметры материалов режущего инструмента и обрабатываемой детали;
- идентифицировать закон поведения материала при больших трансформациях;

- идентифицировать закон разделения и разрушения материала;
 - определить закон контакта между поверхностью режущего инструмента и обрабатываемой деталью;
 - выбрать подход, используемый при моделировании;
 - определить граничные условия;
 - определить стратегию наложения конечно-элементной сетки и тип элементов.
- Рассмотрим данные этапы более подробно.

В модель внедряется геометрия режущей пластины ATI Stellram CNMG542A-4E SP0819 CNMG160608E-4E. CAD модель обрабатываемой детали представлена тремя частями: обработанная и обрабатываемая части, а также стружка. Режущий инструмент состоит из подложки и покрытия.

Физические свойства обрабатываемого материала Ti6Al4V, режущего инструмента (подложка WC-Co и покрытие TiAlN), используемые в модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства Ti6Al4V, WC-Co и TiAlN

параметры	единица измерения	Ti6Al4V	WC-Co	TiAlN
плотность, ρ	кг/м ³	4430	14800	7400
модуль Юнга, E	ГПа	$E(T) = (0.7412 \cdot T + 113375)$	560	600
теплопроводность, λ	Вт/(м·°C)	$\lambda(T) = 7.039 \cdot e^{0.0011 \cdot T}$	55	$\lambda(T) = 0.0081 \cdot T + 11.95$
коэффициент термического расширения, α	м/(м·°C)	$\alpha(T) = 3 \cdot 10^{-9} \cdot T + 7 \cdot 10^{-6}$	0.0000045	0.0000094
коэффициент Пуассона, ν	-	0.33	0.23	0.20
удельная теплопроводность, c_p ,	Дж/(кг·°C)	670	295	480
неупругая тепловая фракция	-	0.9	-	-
сопротивление разрушению, K_c	МПа · $\sqrt{м}$	100	-	-
начальная температура, T_t	°C	20	20	20
температура плавления, T_f	°C	1630	-	-

Среди различных законов поведения материала при больших деформациях, наиболее распространён эластотепловязкопластичный закон Джонсона-Кука. Он

учитывает адиабатические сдвиговые явления, вызванные большими пластическими деформациями и значительными градиентами температур.

Данный закон устанавливает зависимость напряжения σ от степени ϵ (%) и скорости деформации, а также от температуры T , и может быть разложен в мультипликативной форме на три функции:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \cdot \left(1 - \left[\frac{T - T_o}{T_f - T_0}\right]^m\right) \quad [1]$$

Первый множитель описывает явление наклёпа, второй – динамические процессы, третий – явления отпуска.

Множитель, связанный с наклёпом, соответствует напряжению течения постоянной скорости деформации. А – предел эластичности, рассматриваемого материала, В и n соответственно линейные и нелинейные параметры наклёпа.

Второй множитель – мультипликативный фактор, характеризующий динамическое упрочнение материала. Он зависит от эквивалентной скорости пластической деформации. С – коэффициент чувствительности к скорости деформации. Начальную скорость деформации примем равной 1 c^{-1} .

Третий множитель – фактор соответствующий явлению теплового отпуска. T_t – начальная температура. Пренебрегаем эффектом температуры на закон движения. Для температур, находящихся в промежутке между T_t и температурой плавления T_f , напряжение движения сокращается вместе с температурой и стремится к нулю при $T = T_f$.

При температурах стремящихся к температуре плавления напряжение движения практически равно нулю. Таким образом, T_t – это температура, по отношению к которой рассматривается механизм теплового отпуска, а m – показатель степени данного теплового отпуска.

Значения параметров модели Джонсона-Кука для Ti6Al4V представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры модели Джонсона-Кука для Ti6Al4V[5]

A, МПа	B, МПа	C	n	m
1098	1092	0.014	0.93	1.1

Образование и отделение стружки в модели осуществляется на основе закона разрушения материала. Он базируется на методе «эрозии элементов», который заключается в эволюции трещины, зависящей от состояния напряжения деформаций в теле обрабатываемой детали.

Применение такого закона включает два критерия. Первый критерий характеризует требуемую степень разрушения материала, а второй – отвечает за эволюцию трещины, её распространение и отделение элементов друг от друга.

Адаптированный критерий разрушения взаимосвязан с законом движения Джонсона-Кука. Разрушение считается для каждого элемента, начиная с момента когда:

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f},$$

где $\Delta \bar{\epsilon}$ – инкремент результирующей пластической деформации, $\bar{\epsilon}_f$ – результирующая деформация разрушения материала. [3]

Разрушение в материале начинается при $\omega = 1$.

Модель разрушения Джонсона-Кука учитывает термомеханические процессы при больших деформациях. Уравнение результирующей пластической деформации разрушения $\bar{\varepsilon}_f$ представлено в виде:

$$\bar{\varepsilon}_f = [D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \sigma^*)] \cdot [1 + D_4 \cdot \ln \varepsilon^*] \cdot [1 + D_5 \cdot T^*],$$

где $\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ - отношение среднего напряжения (σ_m) и результирующего напряжения вон Мизеса ($\bar{\sigma}$); $\varepsilon^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ - безразмерная степень пластической деформации с расчётной скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$ и пределом, характеризующим момент

чувствительности к скорости деформации $\dot{\varepsilon}_0$; $T^* = \frac{T - T_0}{T_f - T_0}$ – безразмерный температурный коэффициент, где T_f – температура плавления материала, а T_0 – начальная температура; D_1 – начальная деформация разрушения; D_2 – экспоненциальный фактор; D_3 – фактор трёхосности; D_4 – фактор скорости деформации; D_5 – тепловой фактор. [4]

Параметры закона разрушения Ti6Al4V представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры закона разрушения Ti6Al4V [5]

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

В случае, когда критерий разрушения выполняется, вступает в силу критерий развития разрушения. Данный критерий представляет уровень энергии G_f необходимый для развития трещины. После возникновения трещины, поведение материала представляется отношением между напряжением и перемещением, а не между напряжением и деформацией.

Энергия разрушения определяется по формуле:

$$G_f = \frac{K_c^2 \cdot (1 - v^2)}{E},$$

где K_c – стойкость разрушения ; E – модуль Юнга ; v – коэффициент Пуансона. [5]

Таким образом :

$$G_f = \frac{(100 \cdot 10^6)^2 \cdot (1 - 0.33^2)}{110 \cdot 10^9} = 81000 \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right).$$

В момент, когда элемент достигает значения G_f , он удаляется с конечно-элементной сетки и становится равным нулю. Удаление элемента способствует появлению трещины в детали и позволяет образовывать стружку.

Развитие разрушения может быть описано линейным или экспоненциальным законом:

$$D = \frac{\bar{u}}{\bar{u}_f} \quad \text{и} \quad D = 1 - \exp \left(- \int_0^{\bar{u}} \frac{\bar{\sigma}}{G_f} d\bar{u} \right),$$

где \bar{u}_f – результирующее перемещение трещины :

$$\bar{u}_f = \frac{2 \cdot G_f}{\sigma_y},$$

где σ_y – предел эластичности. [6]

Таким образом :

$$\bar{u}_f = \frac{2 \cdot 81000}{109800000} = 0.00015 (\text{м}).$$

Закон контакта между поверхностью режущего инструмента и обрабатываемой поверхностью определяются совокупностью механических и тепловых явлений.

Механические явления опишем моделью трения. В нашем случае примем изотропную модель Куоломба:

$$|\sigma_t| \geq \mu \cdot |\sigma_n|$$

$$|\sigma_t| < \mu \cdot |\sigma_n|,$$

где σ_t , σ_n – составляющие вектора контактного напряжения, μ – коэффициент трения (примем равным 0.32, согласно [2]). [4]

Тепловые явления представлены коэффициентом распределения теплового потока, генерируемого трением. 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 трением Φ_g будет разделяться между двумя телами. Введём понятие коэффициента распределения α , определяющего долю теплового потока Φ_g направленного в тело 1. В нашем случае тело 1 – это режущий инструмент, а тело 2 – обрабатываемый материал:

$$\bullet_{g \rightarrow 1} = \alpha \cdot \bullet_g$$

$$\bullet_{g \rightarrow 2} = (1 - \alpha) \cdot \bullet_g. [6]$$

В упрощённом случае, где два тела находятся в идеальном контакте, отношение Вернотта вместе с коэффициентом распределения α может быть описано в зависимости от следующего отношения физических характеристик двух материалов:

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

где λ_1 и λ_2 – теплопроводность, ρ_1 и ρ_2 – плотность, C_{p1} и C_{p2} – удельная теплопроводность режущего инструмента и обрабатываемого материала соответственно. [6]

Таким образом, для пары TiAlN/Ti6Al4V :

$$\frac{\bullet_{g \rightarrow 1}}{\bullet_{g \rightarrow 2}} = \frac{\sqrt{6.7 \cdot 4.43 \cdot 10^{-9} \cdot 670 \cdot 10^6}}{\sqrt{20 \cdot 7.4 \cdot 10^{-9} \cdot 480 \cdot 10^6}} = 0.53$$

Учтём также коэффициент теплопроводности для пары обрабатываемого и инструментального материала. Согласно [7] он равен 10^8 Вт·м²·°С. Примем минимальное расстояние действия коэффициента равным 1 ?м.

Для наших исследований необходимо получить следующую информацию, касающуюся процесса резания:

- давление в зоне контакта;
- скорость движения стружки по поверхности режущего инструмента;
- распределение тепловых полей в режущем инструменте;
- силы резания.

Для получения данной информации используем динамический/температура-перемещение/эксплисит анализ. Тип элементов – эксплисит пара температура-перемещение.

Для моделирования процесса резания методом конечных элементов применим Произвольный подход Лагранжа-Эйлера.

Границные условия для конечно-элементной сетки и для материала представлены на рис. 1-2.

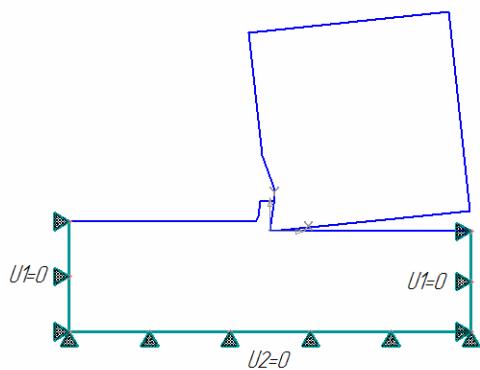


Рис. 1. Граничные условия для конечно-элементной сетки

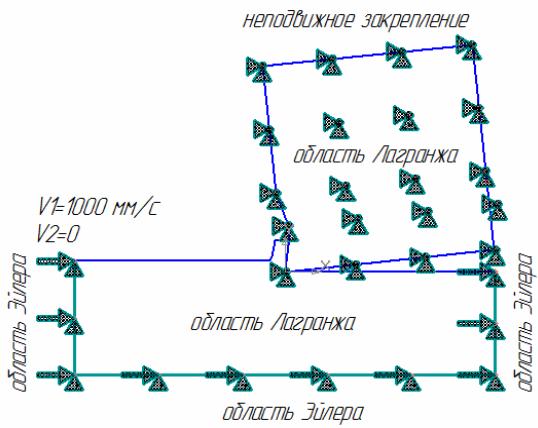


Рис. 2. Граничные условия для материала

Более плотное наложение конечно-элементной сетки позволяет получать более точные результаты при моделировании физических процессов, однако требует больших затрат времени. Поэтому всегда выбирают соотношение между требуемой точностью и временными ограничениями.

Очень важно правильно выбрать размер начальной стружки с целью обеспечения правильного движения материала. С той же целью выполняют разбиение детали на части и повышают плотность сетки согласно определённым критериям.

Выбираем квадратичную структурированную форму для всех элементов детали. В текущем инструменте элементы покрытия имеют квадратичную структурированную форму, элементы подложки - квадратичную свободную форму.

С целью анализа физических процессов в зоне резания, разделим поверхность режущей пластины на зоны, а также пронумеруем их (рис. 3).

Для анализа физических процессов в зонах резания построим графики: контактного давления, контактной температуры, скорости скольжения стружки для следующих режимов резания: подача 0,3 мм/об, скорости резания 40, 60, 80, 100 м/мин (рис. 4-6).

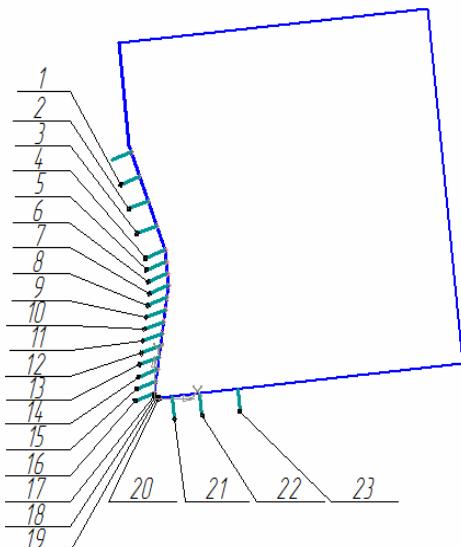


Рис. 3. Зоны режущего инструмента

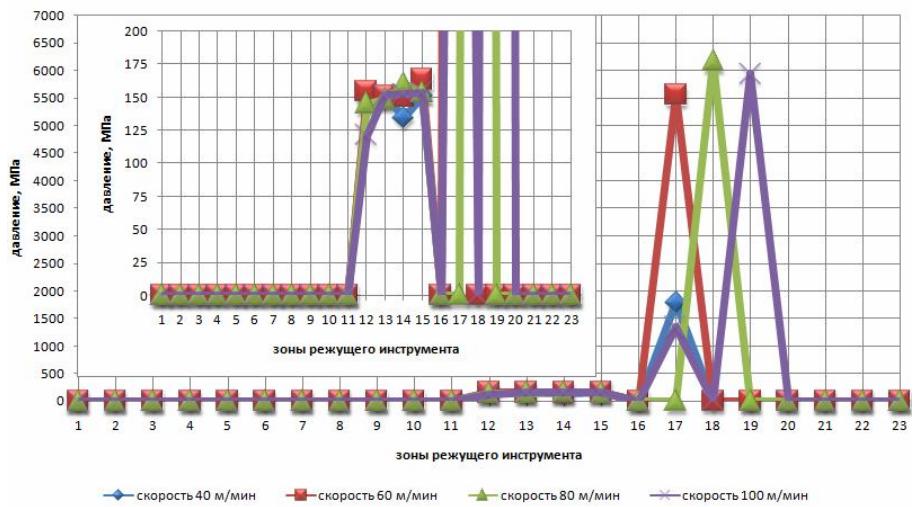


Рис. 4. Контактное давление при обработке Ti6Al4V с режимами резания: подача 0,3 мм/об, скорости резания 40, 60, 80, 100 м/мин

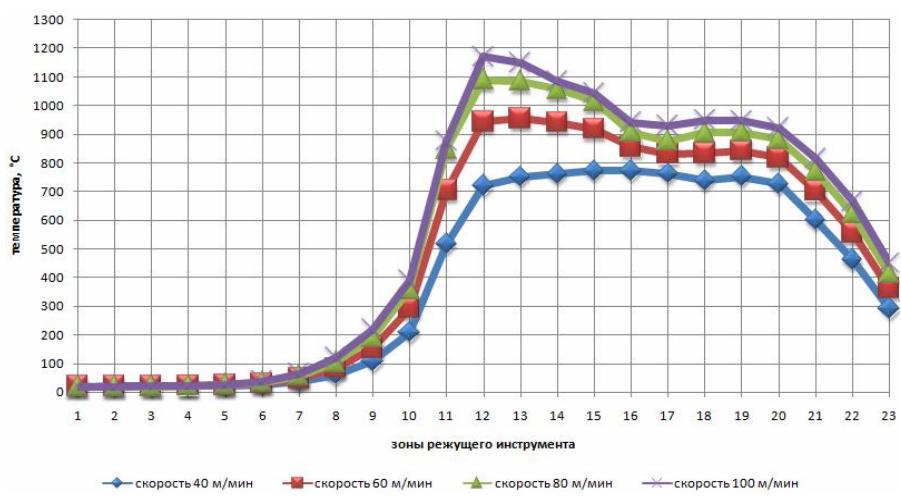


Рис. 5. Контактная температура при обработке Ti6Al4V с режимами резания: подача 0,3 мм/об, скорости резания 40, 60, 80, 100 м/мин

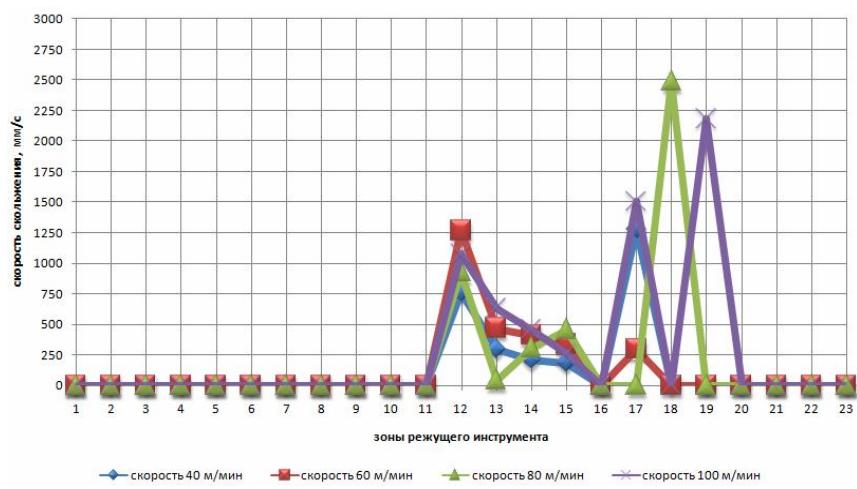


Рис. 6. Скорость скольжения стружки по поверхности режущей пластины при обработке Ti6Al4V с режимами резания: подача 0,3 мм/об, скорости резания 40, 60, 80, 100 м/мин

Исходя из представленных графиков, определим функциональные зоны режущего инструмента и требуемые технологические воздействия для повышения стойкости инструмента. Первая функциональная зона (1-11 зона) характеризуется низкими нагрузками, а, следовательно, нет необходимости в использовании специальных технологических воздействий. Вторая функциональная зона (12-16 зона) характеризуется высокими значениями температур. Средние значения контактного давления, скоростей скольжения стружки по поверхности режущего инструмента позволяют эффективно использовать СОТС с целью охлаждения (средство может проникнуть в зону и выполнить свою функцию). Третья функциональная зона (17-20 зона) характеризуется некоторым снижением и стабилизацией температуры, однако высокие значения контактного давления и скоростей скольжения стружки не позволяют эффективно применять СОТС, поэтому целесообразно изготовить функционально-ориентированное покрытие с высокой твёрдостью в данной зоне. Четвёртая функциональная зона (21-23 зона) не подвергается контактному давлению и скольжению стружки по поверхности инструмента, но является зоной температурных напряжений. Если температура резания не соответствует оптимальной в третьей функциональной зоне, посредством данной зоны можно регулировать температуру, используя СОТС или другие виды технологических воздействий.

3. Заключение

Для исследования зоны резания на основе функционально-ориентированного подхода была разработана компьютерная модель процесса резания с помощью программного обеспечения Abaqus Explicit 6.9-2. Поверхность режущего инструмента была условно разбита на части, благодаря чему был выполнен анализ физических процессов в различных зонах резания (контактное давление, контактная температура, скорость скольжения стружки по поверхности режущего инструмента), а также определены технологические воздействия для повышения стойкости инструмента для каждой функциональной зоны инструмента.

Список литературы: 1. Kalay F. Simulation numerique de l'usinage Application a l'aluminium AU4G (A2024-T351). // *Techniques de l'ingenieur : les bases documentaires techniques et scientifiques*. – 2010. - Disponible sur WEB <<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/travail-des-materiaux-assemblage-ti153/simulation-numerique-de-l-usinage-bm7002>>. 2. Pantale O. Plateforme de prototypage virtuel pour la simulation numerique en grandes transformations thermomecaniques rapides. – Toulouse, 2005. – 229 p. 3. Ducobu F., Filippi E., Riviere-Lorphevre E. Modelisation de l'influence de la profondeur de coupe en micro-coupe orthogonale. // *19eme Congres Francais de Mecanique*. 24-28 aout 2009. - Marseille 2009. 4. Bacaria J.-L. Un modele comportemental et transitoire pour la coupe des metaux. These presentee pour obtenir le titre de Docteur. Specialite : genie mecanique. – Toulouse, 2001. 5. Zhang Y., Mabrouki T., Nelias D., Gong Y. FE-model for Titanium alloy (Ti-6Al-4V) cutting based on the identification of limiting shear stress at tool-chip interface. // *Springer-Verlag France*. - 2010. 6. Pantale O. Modelisation et simulation tridimensionnelles de la coupe des metaux. These presentee pour obtenir le grade de docteur. Specialite : Mecanique. - Tarbes, 1996. – 177 p. 7. Ozel T., Sima M., Srivastava A.K., Kaftanoglu B. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations. // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2010, p. 77–82. - №59.

Михайлів О.М., Сидорова О.В., Волохов Д.В. (ДонНТУ, Донецьк, Україна)

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: sydorova@gmail.com

Анотація. У даній статті представлена методика аналізу фізичних процесів при обробці різанням Ti6Al4V інструментами з покриттям TiAlN на основі функціонально-орієнтованого підходу за допомогою комп'ютерного моделювання процесу різання.

Ключові слова: процес різання, функціонально-орієнтований підхід, контактний тиск, контактна температура, швидкість ковзання стружки.

**ANALYSIS OF PHYSICAL PROCESSES IN MACHINING Ti6Al4V WITH TiAlN COATED
TOOLS BASED ON FUNCTIONAL-ORIENTED APPROACH**

Mikhailov A.N, Sydorova E.V, Volohov D.V. (DonNTU, Donetsk, Ukraine)

Tel./Fax: +38 (062) 3050104; E-mail: sydorova@gmail.com

Abstract. This article presents a methodology for analysis physical processes in machining Ti6Al4V with TiAlN coated tools based on functionally-oriented approach through a computer model of the cutting process.

Keywords: cutting process, functional-oriented approach, contact pressure, contact temperature, sliding speed chips.

Надійшла до редколегії 11.02.2011.