Міністерство освіти і науки України Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

2'2009

ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУ.ВАННІ

Збірник наукових праць

G. Balla, Miskolc, Hungary

THE HUMAN RESOURCE AS A TOOL IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR THE DEVELOPMENT OF SPATIAL ECONOMIC STRUCTURE

Технологічні системи, і зокрема високотехнологічні системи, не здатні функціонувати без розвитого керування персоналом, і тому в таких системах HR відіграє найважливішу роль, починаючи з їхньої розробки, виробництва і закінчуючи їх впровадженням і експлуатацією. Основним показником розвиненості тієї або іншої економіки є рівень розвиненості її технологічних систем, необхідних для збільшення економічної конкурентоспроможності. Для економіки pezioнів і для розвиту їхніх технологічних систем важливо визначити фактори, а також ступінь їхнього впливу на економічний розвиток регіонів. У дійсній публікації освітлена роль індексу розвитку людського потенціалу (HDI), що є одним з основних показників соціальної структури малих районів Північно-угорського регіону, у якості одного з головних засобів технологічних систем і його взаємозв'язок з економічною структурою Північно-угорського регіону.

For the sake of comparing regions it is practical to characterise the economic situation of the region by the indicators of the spatial economic structure. The spatial economic structure of the region or the microregions of the region depends to a great extent on the spatial social structure of the region or the microregions of the region 1, 2.

Spatial structure means the summary of territorial relations and processes. The discussion of the relations within the spatial structure contains the summary of the decisive processes in the territory.

Spatial structure does not only mean the territorial scope of economic and social processes and a summary thereof but also represents in a spatial structure the variety, internal structure, interaction, mutual determination and controversies of processes going on in the various territorial units. The spatial structure is a scheme built of spatial elements and the spatial relations among them, a real phenomenon, the interpretation and description whereof being substantially determined by the mode and views of the approach.

We can establish on the basis of Hungarian technical literature that there may be many indicators for the spatial structure.

The contents of the spatial structure are varied but they can be examined in a complex way, too. The basis for examining the spatial structure is provided by numerical information and data relating to the territorial units.

The most important types of processes for the generation of complex indicators are as follows:

- Rank number method: This is the simplest method both from a theoretical and a practical point of view. From a given "n" number of ordinary or such indicators (rankings) as have been made ordinary, a complex indicator can be generated by the addition thereof. In such a case we will regard such region as having the most favourable situation as has the lowest total of the rank numbers.

- *Complex indicator Bennett:* In this process the particular values of each indicator are expressed as a percentage of the maximum of the given indicator. The non-weighted arithmetical average of these values result in a complex indicator the values whereof fall theoretically in the range 0 to 100. It is very rarely for the value of a complex indicator to reach 100 where the value of the same territorial unit is the most favourable, that is, maximal for each indicator studied. In practice, the theoretically possible minimum, that is 0, can also rarely be observed.

– Factor analysis: In deploying this method, we generate such independent factors out of the linear combination of the variables to be analysed as explain the biggest possible portion of the total variances of the original variables. This operation is advantageous for us because – at the expense of some lost information – the many separated variables are united to form fewer groups of indicators comprising factors whereby it is easier to handle and interpret the system. The factor weights in the resulting factor matrix refer to the extent the particular variable takes part in forming the particular factors. In the process, the original variables are standardised during which they lose their unit of measure and dimensions, that is, they hence become comparable without limitation. Beside this, a common feature of standardised variables is that their arithmetic average will exactly equal zero and their dispersion will be 1. Consequently, the average of the factor values belonging to the factor values will also be zero and their dispersion will be one. The factors have absolutely no correlation with each other. In examining the spatial structure we can talk about spatial economic structure and spatial social structure.

The exploration of the spatial economic structure covers the presentation in terms of economics of various regions such as regions, counties, microregions and settlements, the display in space of their features and thereby the analysis of the spatial aspects of the economy 3.

The range of indicators to be used for exploring the spatial economic structure is rather limited, which means, that practically data broken down by territory only are available, a number of data are available on a county level only and an additional problem is the limitation of the possibility to express numerically the spatial aspects of the economy.

We explore the quantitative and qualitative characteristics of the spatial structure of the economy, whereby complex indicators need to be assigned to the spatial structure; however, the absolute and relative numbers cannot be incorporated in them at the same time.

In the following evaluation of the spatial economic structure from the aspects of area development, the indicators used by VÁTI 4 in the year 1998 are presented.

The area studied is 28 microregions in the Northern Hungarian region and the territory level of the study is that of the microregion.

According to the combined analysis of status and changes of the 10 indicators used for the study, one can distinguish among 5 types of regions having a different path of development, and the particular microregions were classified by the use of the factor analysis method in 5 types according to their status of development and changes in their status:

- Dynamically developing regions,

- Developing regions,
- Emerging regions,
- Revitalising regions,
- Stagnating regions.

Table 1 contains the classification of the Northern Hungarian region according to the above region types and one of the most important indicators of the 10 indicators for foreign capital investment, that is, the share of foreign working capital as a percentage of the total subscribed capital.

m 11 1		1	•			C .1	•	•	C .1		NT .1	тт	•	•
	Tho	17017	000000000	1001	antor	ot tho	mor	Oro mono	0+ +k	<u>ao</u>	Vorthorn	Luna	orion	romon
Tame 1		KHV			CAIOL	OF THE	1111(11)	DEPOILTING	()		NOTHETH	HIIIU	анан	revion
I UUIC I	1110		CCONDINC	111/11	cutor		TTHCT.		OI U		1 OI UICI II	TIGHE	uiiuii	I C LI O II
														- 67

Microregion	Region type	Foreign capital as % of the subscribed capital
Borsod-Abaúj-Zemplén megye		-
Bodrogközi	Stagnating region	11-30
Sátoraljaújhelyi	Stagnating region	11-30
Sárospataki	Stagnating region	11-30
Abaúj-Hegyközi	Stagnating region	0-10
Tokaji	Stagnating region	11-30

Szerencsi	Stagnating region	11-30
Szikszói	Stagnating region	0-10
Encsi	Stagnating region	0-10
Edelénvi	Stagnating region	0-10
Miskolci	Developing region	31-50
Tiszaújvárosi	Dynamically developing	51-91
Mezőcsáti	Dynamically developing region Emerging region	11-30
Mezőkövesdi	Emerging region	11-30
Kazincharcikai	Stagnating region	11-30
Ózdi	Revitalising region	31-50
Heves megve		
Egri	Developing region	31-50
Gvöngvösi	Developing region	51-91
Füzesabonvi	Emerging region	0-10
Hatvani	Developing region	31-50
Hevesi	Stagnating region	0-10
Pétervásárai	Developing region Revitalising region	31-50
Bélapátfalvai	Developing region	31-50
Nógrád megye	1 0 0	
Balassagvarmati	Revitalising region	11-30
Salgótariáni	Stagnating region	11-30
Rétsági	Revitalising region	51-90
Pásztói	Revitalising region	31-50
Bátonyterenyei	Revitalising region	31-50
Szécsénvi	Stagnating region	11-30

Human resources comprise individual skills and endowments belonging to the individual immanently but remaining partly unutilised or unused in the given structure of economic conditions.

Others hold that human resources are to be understood as the knowledge, abilities and behaviour of subordinates and managers and what they regard as valuable.

The quality and availability of human resources determine to a great extent the competitiveness of a region.

HDI, the human development index, one of the most important indicators of the indices characterising the human resources of the Northern Hungarian region is presented below.

TT 1 1 0 1	IDI	1	1.	.1	• •	C .1	NT /1	TT ·	•
Table 7 – I	нтл	values	regarding	the	microremons	of the	Northern	Hungarian	region
1000 2		values	regurants	une	meroregions	or une	ronthern	Trangarian	region

Microregion	HDI value				
Borsod-Abaúj-Zemplén megye					
Bodrogközi	No data				
Sátoraljaújhelyi	0,321				
Sárospataki	0,337				
Abaúj-Hegyközi	No data				
Tokaji	No data				
Szerencsi	0,313				
Szikszói	0,286				
Encsi	0,212				
Edelényi	0,182				
Miskolci	0,566				
Tiszaújvárosi	0,480				
Mezőcsáti	No data				
Mezőkövesdi	0,402				
Kazincbarcikai	0,498				
Ózdi	0,304				
Heves megye					
Egri	0,668				
Gyöngyösi	0,609				
Füzesabonyi	0,386				
Hatvani	0,532				
Hevesi	0,246				
Pétervásárai	0,392				
Bélapátfalvai	No data				
Nógrád megye					
Balassagyarmati	0,520				
Salgótarjáni	0,515				
Rétsági	0,469				
Pásztói	0,399				
Bátonyterenyei	0,381				
Szécsényi	0,296				

The value of HDI 5 is constituted by the arithmetic average of three indices. Each of them is generated by projecting the numerical values between 0 and 1. Before, the values 0 and 1 were constituted by the two extreme figures, however, for the sake of comparison on a yearly basis, (rather voluntarily) fix values were determined: 25 and 85 years for life expectancy, 100 and 40 000 USD for GDP where logarithmical conversion is used, while 0 and 100% for the literacy rate and the gross enrolment ratio. The three indices are as follows:

life expectancy index:

- education index:

(1)

$$\frac{2 \times ALI + GEI}{3}$$

- GDP index:

$$\frac{\log(GDP_{pc}) - \log(100)}{\log(40000) - \log(100)}$$

Where: LE = Life expectancy, ALI = Adult literacy rate, GEI = Combined gross enrolment ratio, GDPpc = GDP per capita at purchasing power, in dollar.

HDI values published by KSH 6 in the year 2002 regarding the microregions of the Northern Hungarian region are set out in Table 2.

(2)

(3)

According to the previous datas, which are almost concurrent for the purposes of this study, Fig.1 shows the relation between HDI and the region type in relation to the Northern Hungarian region.



Fig. 1 – Relation between HDI and region types

Pursuant to the straight linear trend as per Fig.1, it can be established that the region type and the value of HDI are essentially in direct proportion to each other, that is, the more dynamically the microregion is developing, the higher the value of the HDI.

According to the previous datas, which are almost concurrent for the purposes of this study, Fig.2 shows the relation between HDI and the foreign capital.

Pursuant to the straight linear regression line as per Fig.2, it can be established that the two indicators are essentially in direct proportion to each other, that is, the higher the extent of foreign capital investments, the higher the value of the HDI.

Relations between the spatial economic structure and the human development index of the microregions of the Northern Hungarian region have been examined in this publication.

On the basis of the study it can be stated that the more developing a microregion is, the higher the human development indices in the particular microregion and if in a microregion the human development indices are high, the microregion is more attractive for the inflow of foreign capital.



Fig.2 – Relation between HDI and foreign capital

It can be established that where a microregion is developing more and more and the higher the presence of foreign capital in the particular microregion, the more it can develop and the higher its competitiveness.

The economic development of a microregion entails the development of human resources, too, and where human resources are on an advanced level in a region, the region becomes more attractive to the investors and thus the economy and the technological systems of the region can also start developing.

References: 1. VÁTI (2003): Research into new dimensions facilitating the study of the spatial economic structure and the relevant methods, VÁTI kiadvány, Budapest, 2. Berey K. - Kulcsár G. (2000): Summarising of the report to the Parliament on area development, Falu, város, régió, Budapest, 3. Salamin G. (2004): Recent processes in the formation of the spatial economic structure, Falu, város, régió, Budapest, 4. VÁTI (2003): Situations of microregions, www.vati.hu, Budapest, 5. KSH (2006): The human development index, Statisztikai tükör, Budapest, 6. KSH (2003): Teritorial statistical book of the year, www.ksh.hu, Budapest.

А.И. Бажал, д-р техн. наук, А.А. Бажал, Сарафанова М.А., Харьков, Украина

ФАЗОВАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ КОЛЛЕКТОРОВ В ПРИЛОЖЕНИИ К ДОБЫЧЕ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ

The basic physical laws and quantitative estimations of phase permeability of collectors in the appendix to extraction of stocks which are resulted are difficultly taken.

На основі базових законів фазової проникності досліджуються технологічні підходи до видобутку важкодобувних запасів копалин вуглеводородів.

Проницаемости по нефти и воде зависят только от геометрии пористой среды, характеристик смачивания, степени насыщения среды этими жидкостями и практически не зависят от давления жидкости, расхода и параметров потока [9,8].

Капиллярным силам в этом случае отводится роль фактора, стабилизирующего, фронт вытеснения. Демпфирующую роль здесь играет гистерезис смачиваемости пор.

Зависимость фазовых проницаемостей только от локальной насыщенности фильтрующих фаз предполагает равновесность их распределения. Физический смысл этого заключается в том, что из всех возможных распределенных фаз реализуется термодинамически наиболее выгодное (т.е. равновесное). Установление равновесного распределения фаз, однако, требует определенного времени. Это время зависит, от того, что реально понимается под «элементарным макрообъемом» - той предельной степенью дискретизации, которая допускается в теории фильтрации. Практическая значимость неравновесных эффектов определяется тем обстоятельством, что реальный масштаб осреднения в задачах разработки нефтяных месторождений сопоставим с расстояниями между скважинами и составляет по крайней мере

десятки метров. Соответствующие времена установления равновесий т измеряются годами. Поэтому несвоевременность фильтрации будет существенно влиять на показатели разработки, и важно знать возможные последствия такого влияния.

В процессе образования залежей нефти, за огромные геологические времена в пластовой системе было достигнуто термодинамическое равновесие, при этом все поверхности порового пространства, которые могли быть смочены углеводородами, уже заняты ими. Эксперименты показали [1], что на поверхности при этом образовались органоминеральные комплексы, которые не разрушаются даже в процессе экстракции образцов. Это подтверждается тенденцией к увеличению остаточной насыщенности нефтью для образцов коллектора. Наличие свободного газа в системе, является дополнительным фобизирующим поверхность фактором.

Из этого следует, что капиллярная пропитка, как движущий процесс перераспределения фаз, замедлен в процессе вытеснения нефти водой, термодинамически равновесные распределения фаз достигается очень медленно, и что неравномерность процесса фильтрации должна быть учтена при проектировании разработки нефтегазовых залежей.

С точки зрения моделирования процессов разработки месторождений, в уравнениях, описывающих процесс фильтрации в период неравновесности распределения фаз в поровом объеме появится функциональная зависимость фазовых проницаемостей и остаточной нефтенасыщенности от характера и интенсивности воздействия на пластовую систему.

Для оценки влияния неравновесного распределения фаз на процесс вытеснения нефти водой разработан метод расчета коэффициентов нефтеизвлечения, учитывающий применение известных в практике методов увеличения нефтеотдачи пластов, пересмотрены понятии коэффициентов вытеснения и охвата коллектора воздействием, а также предела коллектора, которые являются динамическими величинами [2,3].

Получена связь фазовой проницаемости коллектора от структуры остаточной и текущей нефтегазонасыщенности. При этом использованы следующие предположения:

- распределение фаз при фильтрации несмешивающихся жидкостей не равновесно;

- каждая из фаз движется по своим каналам; наиболее крупные поры заняты более подвижной жидкостью;

- часть фаз из – за действия капиллярных сил не участвует в движении нефти и газа (насыщенность ниже критической);

- движущаяся нефть донасыщает поры до предельного значения, определяемого условно не вытесняемым объемом воды в порах.

Условно не вытесняемый объем можно описать безразмерным коэффициентом, который в первом приближении можно считать константой, зависящей только от свойств породы (минерального состава, удельной поверхности, условий вытеснения). Величину его можно получить из обработки кривых капиллярного давления [2].

Критическая водонасыщенность коллектора также является функцией интенсивности процесса и зависит от условно не вытесняемого объема воды и объемной доли пор, участвующих в фильтрации жидкости.

На основе этих предположений создается алгоритм расчета динамических фазовых проницаемостей коллектора по нефти, газу и воде, как функции многих параметров, таких как: перепад давления, вязкости вытесняющей среды, начальной и текущей нефте – и газонасыщенности, фильтрационно-емкостных свойств и текстурных особенностей коллектора, поверхностного натяжения на границе нефть – вода, вода – газ.

Динамические фазовые проницаемости рассматриваются исходя из структуры остаточной и текущей нефте – и газонасыщенности, которая для трехфазной смеси определяется системой уравнений [1].

При $S_h \ge S_k$

$$S_{2} = Z_{2} (1 - \beta_{\varphi} - y K_{H}).$$
(1)
$$S_{2} = (1 - Z) K_{2} + Z_{2} (1 - \beta_{2}) + Z_{2} y K_{2} + Z_{2} y K_{2}$$
(2)

$$S_{H} = (1 - Z) (1 - K_{H}) + \beta_{C6} (Z - Z_{6}) + Z_{6} (1 - y K_{H})$$
(2)
$$S_{6} = (1 - Z) (1 - K_{H}) + \beta_{C6} (Z - Z_{6}) + Z_{6} (1 - y K_{H})$$
(3)

$$Z_{6} + Z_{H} + Z_{2} = Z$$
(4)

$$Z_{2} = S_{2} / I - \beta_{C6} - y K_{H}$$
(5)

$$Z_{6} = (S_{6} - (I - Z)(I - K_{H}) - \beta_{C6} Z) / (I - y K_{H} - \beta_{C6})$$
(6)

$$Z_{H} = Z - Z_{6} - Z_{2}$$
(7)

При $S_{\theta} < S_{\kappa}$

$$S_{2} = Z_{2} \left(1 - \beta_{CB,m} - y K_{H} \right)$$

$$S_{\mu} = \left(1 - Z_{\mu} \right) K_{\mu} + Z_{\mu} \left(1 - \beta_{CB,m} \right) + Z_{2} y K_{\mu}$$
(8)
(9)

$$S_{H} = (I - Z) K_{H} + Z_{H} (I - \rho_{C6,m}) + Z_{2} y K_{H}$$

$$S_{6} = (I - Z) (I - K_{H}) + \beta_{C6,m} Z$$

$$(10)$$

$$Z_{H} + Z_{2} = Z$$
(11)

$$Z_{2} = S_{2} / (1 - \beta_{ce.m} - \varphi * K_{H})$$

$$Z_{H} = Z - Z_{2}$$
(12)
(13)

$$\beta_{c_{6.m}} = (S_{6} - (1 - Z) (1 - K_{H}))/Z$$

$$S_{\kappa} = (1 - Z) (1 - K_{H}) + \beta_{c_{6.m}} *Z$$
(14)
(14)
(15)

$$S_{\kappa} = (1 - Z) (1 - K_{\mu}) + \beta_{ce.m} * Z$$

где S_{H}, S_{G}, S_{2} – насыщенность нефти, воды и газа соответственно;

*S*_{*k*} – критическая водонасыщенность;

Z_H,Z₆,Z₂ – для пор, участвующих в фильтрации нефти, воды и газа;

Z – доля пор, участвующих в фильтрации;

К_н – коэффициент начальной нефтенасыщенности;

φ – коэффициент зависящий от свойств пласта [2,3].

Алгоритм расчета фазовых проницаемостей, учитывающий структуру остаточной и текущей нефте – и газонасыщенности, зависит от характера первоначальной насыщенности коллектора и заключается в определении для первоначального нефтенасыщенного коллектора следующих параметров:

- остаточной нефтенасыщенности

$$K_{OH} = K_{H} (1 - Z) + K_{H} * Z * \varphi;$$
(16)

- объемной доли пор, участвующих в движении

$$Z = K_{H} - K_{OH} / K_{H} (1 - \varphi)$$

$$\tag{17}$$

- критической водонасыщенности S _к;

- доли пор в зависимости от водонасыщенности, по которым движется вода - Z_в;

- фазовой проницаемости по воде, при $S_{\theta} > S_{\kappa}$

$$f_{\theta} = \left(\left(1 - \varphi K_{H}\right)^{4} (0,081 \ln \left[\left(1 - \varphi K_{H}\right)^{4} K\right] + 0,333)Z_{\theta}\right) / (2 - Z_{\theta})$$
(18)

где К – абсолютная проницаемость коллектора, мд;

- фазовой проницаемости по нефти

$$f_{H} = (y_{1} - y_{2}) (1 - \beta_{c_{B}})^{4/3}$$
(19)

где у 1 определяется из системы уравнений

$$Z = exp(-X^{2})(X^{2} + 1)$$

 $y_1 = 0,5 \ exp(-X^2)(X^4 + 2X^2 + 2);$ y 2 определяется из системы уравнений

 $Z = exp(z X^2) (X^2 + 1)$

$$y_2 = 0.5 \exp(-X^2) (X^4 + 2X^2 + 2);$$

При S_B<S к фазовая проницаемость по воде f _в = 0, фазовая проницаемость по нефти определяется из выражения

$$\varphi_{\rm H} = y_1 \left(1 - \beta_{{\rm CB}.{\rm m.}} \right)^{4/3} \tag{20}$$

Для первоначально насыщенного коллектора (двухфазное движение) при $S_{\theta} > (1 - K_{OH})$, фазовая проницаемость по нефти $f_{\rm H} = 0$, а фазовая проницаемость по воде рассчитывается по формуле

 $f_{6} = ((0,081 \ln K] + 0,333) \hat{W}(1 - \beta_{c6})) / ((1 - \beta_{c6}) \hat{W} + 2K_{n}))$ (21)

где W определяется из уравнения

$$(1 - S) = (1 - \beta_{c_{\beta}}) / (1 + ((1 - \beta_{c_{\beta}}) W) / K_n)$$

При S₆ < ($1 - K_{OH}$) фазовые проницаемости рассчитываются по формулам (18) – (20) при условии что $\varphi = 0$; $K_n = 1 - \beta_{CB}$.

Для первоначально нефтенасыщенного коллектора при фильтрации трех фаз при $S_B \ge S_k$ фазовая проницаемость по воде рассчитывается из выражения (18), фазовая проницаемость по нефти определяется выражением

$$f_{H} = (y_3 - y_2) (1 - \beta_{CB})^{4/3}$$

где у 3 определяется из системы уравнений

$$Z_{\theta} + Z_{H} = exp(-X^{2})(X^{2} + I)$$

$$y_3 = 0,5 \ exp(-X^2)(X^4 + 2X^2 + 2),$$

а фазовая проницаемость по газу

$$f_2 = (y_1 - y_3) (1 - \beta_{c_{\beta}})^{4/3}$$

при $S_{\theta} < S_{\mu}$ фазовая проницаемость по воде $f_{\theta} = 0$, фазовая проницаемость по нефти определяется выражением

 $f_{H} = y_{3} (I - \beta_{CB})^{4/3}$

а фазовая проницаемость по газу

$$f_2 = (y_1 - y_3) (1 - \beta_{c_{\beta}})^{4/3}$$

Динамические фазовые проницаемости отличаются следующими свойствами:

увеличение скорости фильтрации ведет к увеличению фазовой проницаемости по нефти;

- при достижении критической водонасыщенности квазилинейная зависимость относительной проницаемости по нефти от водонасыщенности меняется на резко нелинейную;

- при увеличении абсолютной проницаемости различие скоростей на порядок не приводит к существенному изменению фазовых проницаемостей [2,3,4].

Такой характер зависимости фазовой проницаемости от динамики фильтрационного движения обуславливает увеличение доли безводной нефти при увеличении темпов отбора жидкости из скважин, что хорошо подтверждается практикой разработки месторождений [2,4].

Исходя из этого, для эффективной разработки трудноизвлекаемых запасов все методы увеличения нефтеотдачи пластов должны быть направлены на увеличение скорости вытеснения нефти водой в нефтенасыщенном объеме пласта. Однако, достигнув максимального темпа отбора жидкости по конкретной скважине, допустимо лишь небольшое его последующее снижение. Таким образом, при всех видах интенсификации (в том числе ГРП), следует проектировать тот темп отбора, который возможно удержать в последующем.

Список литературы: 1. Черемисин Н.А., Сонич В.П., Пневских А.В. Новейшее представление о фазовой проницаемости коллекторов западной Сибири и ее влияние на разработку трудноизвлекаемых запасов. В Сборнике «Освоение месторождений трудноизвлекаемых и высоковязких нефтей». Краснодар. Советская Кубань, 2000 г. 2. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. Пер. с англ. М.Мир 1964 г. 3. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М. Недра, 1984 г. 4. Бажал А.И., Бажал А.А., Сарафанова М.А. Обеспечение жидкостной проницаемости горных пород на месте залегания залегания с помощью силовых волн. В сборнике «Високі технології в машинобудуванні» Национальный технический Университет (ХПИ), 2/ 2007г., г. Харьков.

Поступила в редколлегию 01.07.2009

А.И. Бажал, А.А. Бажал, д-р техн. наук, М.А. Сарафанова, Харьков, Украина

ПРИРОДНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ И ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА В НИХ

The basic laws and quantitative estimations of movement of oil and gas in natural collectors are resulted, technologic canfull for leading by this movement.

В статті представлено основні закономірності руху нафти і газу в прородних колекторах, а також технологічні можливості керування цим рухом.

Месторождения нефти и газа чаще всего приурочены к поднятиям или складкам пластов терригенных (карбонатных) и гранулярных осадочных пород - песчаников, известняков, алевролитов, глин, представляющих собой скопления зерен минералов, связанных цементирующим материалом в процессе геологической эволюции.

Поровое пространство терригенных пород – сложная нерегулярная система сообщающихся и глухих межзеренных пустот с размерами пар, составляющими единицы, десятки микрометров, а часто и сотые доли микрометра.

В карбонатных породах (известняках, доломитах) система пор более неоднородна, кроме того, гораздо более развита система вторичных пустот, возникших после образования самой породы.

Жидкие и газообразные углеводороды, плотность которых меньше плотности воды, скапливается в поднятиях (ловушках) пород, вытесняя ранее находившуюся там воду. Продуктивные коллекторы должны быть изолированы от выше и нижележащих проницаемых пластов кровлей и подошвой – слоями непроницаемых пород, чаще всего представленных глиной или солью. Структура нефтяных и газовых залежей осложняется значительной неоднородностью и, прежде всего многослойностью слагающих их пород.

Одна из основных особенностей фильтрации нефти и газа в пластах заключается в необходимости одновременно рассматривать процессы в областях, характерные размеры которых различаются на порядки: размер пор (единицы и десятки микрометров), диаметр скважин (десятки сантиметров), толщины пластов (единицы и десятки метров), расстояния между скважинами (сотни метров), протяженность месторождений (до десятков и даже сотен километров). Кроме того, неоднородность пластов (по толщине и площади) имеет характерные размеры практически любого масштаба [1].

Сведения о коллекторе состоят из геологической и геофизической информации – исследования новых образцов и гидродинамических исследований скважин, результатов анализа отобранных из скважин проб нефти, газа и пластовой воды, и наконец, из совокупности данных по динамике изменения давлений, отбора или закачки нефти и воды по отдельным скважинам и в целом по объекту.

Любая модель пласта строится на интерполяции по массе данных, полученных на основе единичных скважинных измерений, и обычно нет серьезных оснований считать такую модель адекватной фактическому пласту.

В этих условиях основная задача исследования пласта заключается в установлении качественных закономерностей, устойчивых тенденций, а также количественных соотношений, устойчивых к вариации исходных данных.

Целью расчета оказывается не столько точное определение всех характеристик добычного процесса, сколько расширение той совокупности сведений, которые необходимы при выборе, например, системы разработки месторождения или метода воздействия на пласт.

Важная характеристика пористой среды – ее пористость, равная отношению объема V_n , занятого в выделенном элементе порами, к общему объему элемента V:

m = Vn / V

Это соотношение определяет среднюю пористость. Пористость различают полную, когда учитывают все поры, и активную, когда учитываются лишь те, которые входят в единую систему соединенных между собой пор и могут быть заполнены жидкостью извне. Для целей добычи углеводородов существенна лишь активная пористость.

Пористость одинакова для геометрически подобных сред и не характеризует размеров пор. Поэтому указывается некоторый характерный размер порового пространства *d*. За характерный размер *d* принимают некоторое среднее значение диаметра порового канала.

Основное соотношение теории фильтрации – закон фильтрации – устанавливает связь между вектором скорости фильтрации и полем давления ,которое вызывает фильтрационное движение.

Большинство фильтрационных движений – безинерционны, плотность, как мера инерции, несущественна и исключается из рассмотрения. Тогда используют закон Дарси:

$$U = -(\kappa / M)$$
 grad P, $k = d^2 f$,

где *k* – проницаемость (имеет размерность площади, не зависит от свойств жидкости и является чисто геометрической характеристикой пористой среды), *µ* - вязкость жидкости;

$$f = cd^{2}/\mu; c = d^{2}\mu f,$$

Закон Дарси – следствие предположения об инерционности движения жидкости – это частный случай ползущего течения, для которого характерно преобладание вязких сил над инерционными (числа Рейнольдс очень малы- $R_e \ll I$).

При значительных скоростях, когда уже нельзя не учитывать инерционной составляющей сопротивления движению массы жидкости, предпосылки, заложенные в законе Дарси, перестают быть справедливыми.

Для этого случая предложен двучленный Закон Фильтрации:

$$(k/\mu)$$
 grad $p = \overline{U} + \beta k^{\frac{1}{2}} \mu^{-1} \rho u \overline{u}$

Здесь в качестве характерного размера принята величина $k^{\frac{1}{2}}$ и учтено, что при $u \to 0$ должен быть справедлив закон Дарси [1].

Двучленный Закон Фильтрации хорошо описывает данные наблюдений даже для весьма больших значений чисел Рейнольдса. Для несцементированных (насыпных) пористых сред этот закон справедлив вплоть до чисел Рейнольдса порядка 10 - 100, тогда как отклонения от линейного закона начинаются при $R_e = 0, 1 - 1, 0$.

Неоднократно делались попытки выбрать характерный размер d таким образом, чтобы процесс фильтрации в пористых средах различной структуры описать единой формулой. Оказалось успешным введение в качестве характерного размера величины $(k/\mu)^{1/2}$, предложенное М.Д. Милионщиковым. Тогда число $R_e = \rho u k^{\frac{1}{2}} m^{3/2} / \mu$

В задачах фильтрации нефти и газа в природных пластах применение двучленного закона ограничено движением в прискважинной зоне высокодебитных скважин и фильтрацией в трещиноватых средах. Кроме нарушений Закона Дарси на больших скоростях, он может нарушаться и на очень малых скоростях, когда проявляются реологические свойства движущихся жидкостей.

Отметим влияние давления на свойства жидкостей – воды и нефти – плотность р и вязкость µ [1].

Для однородных капельных жидкостей – воды и нефти – изменения плотности в пластовых условиях обычно невелики: встречающиеся в фильтрационных движениях перепады давления (единицы $M\Pi a$) весьма малы по сравнению с модулями объемного сжатия капельных жидкостей ($K_p = 5*10^5 - 2*10^3 \ M\Pi a$). Поэтому обычно ограничиваются линейной зависимостью:

$$\rho_{(p)} = \rho_0 [1 - (p - p_0)/k_p]$$

Хотя сжимаемость капельных жидкостей мала, она играет значительную роль в тех случаях, когда возмущения давления захватывают обширные области. Здесь существенно то, что нефтяные залежи обычно граничат с пластовой водой, суммарный объем которой значительно больше объема нефти в залежи. В результате этого за счет расширения воды со снижением давления может полностью компенсироваться извлекаемый объем нефти. Зависимостью вязкости капельных жидкостей от давления обычно можно пренебречь. Сказанное не относится к нефти, находящейся в контакте с природным газом, в этом случае при повышении давления увеличивается количество растворенного в нефти газа, ее плотность и вязкость заметно падают.

Согласно кинетической теории газов, вязкость их не должна зависеть от давления. Это утверждение не применимо к условиям, характерным для газового пласта. При фиксированной температуре вязкость газа может изменятся на десятки процентов при изменении на единицы *мПа*.

Проанализируем зависимость от давления свойств пористой среды – пористости и проницаемости. Для этого рассмотрим поведение насыщенного жидкостью образца при одноосном нагружении. Предположим, что нагрузка *F* на цилиндрический образец площадью поперечного сечения *S*, заключенный в непроницаемую оболочку, создается непроницаемым поршнем. Снизу на проницаемое основание действует давление р, равное давлению жидкости [1]. Тогда из условий равновесия образца в пренебрежении силами трения о боковые стенки следует:

$$F = pS + F_1$$

Здесь F_1 – сила, действующая на проницаемое основание. Очевидно, F=GS, где G – полное напряжение в насыщенном образце; $F_1 = G^t S$, где G^t – напряжение воспринимаемое твердым скелетом (в расчете на всю площадь *S*). После подстановки получаем:

$$G^t = G - P$$
,

где G^{t} – эффективное напряжение.

Изменение пористости в условиях одноосного нагружения происходит под действием этого напряжения, вызывающего перестройку скелета пористой среды. Изменения пористости в зависимости от давления при фиксированной нагрузке, обусловленное сжимаемостью зерен, мало по сравнению со сжимаемостью пористой среды в целом, обусловленной зерен.

Так при действии на пористую среду только приложенного внутри нее гидростатического давления касательные напряжения не возникают, касательные компоненты тензора эффективных истинных напряжений совпадают, а нормальные компоненты отличаются на величину Р.

Вес горных пород, лежащих над пластом, уравновешивается системой напряжений в пористой среде и гидродинамическим давлением жидкости. Систему жидкость – пористая среда можно представить себе как некоторую деформируемую сплошную среду, в которой к нормальным напряжениям, действующим в пористой среде, добавляются нормальные напряжения, воспринимаемые жидкостью.

Если упругие постоянные пород пласта и кровли примерно одинаковы, смещение кровли обусловленное изменением давления жидкости, насыщающей породу пласта и пропорциональные его толщине, распределяются на всю огромную толщину вышележащего массива горных пород. Поэтому соответствующие относительные деформации в этом массиве малы и, следовательно, малы возникающие в нем дополнительные напряжения (в частности, напряжения на кровле и подошве пласта). Однако, когда вышележащая толща в отличие от пород пласта сложена из очень жестких пород, при локальном понижении давления могут образоваться своды, и при изменении давления жидкости напряжения на кровле и подошве пласта будут меняться.

Зависимость пористости и проницаемости пород коллекторов от среднего нормального напряжения обычно определяется на приборах одноосного и двухосного сжатия. Приращение пористости и проницаемости выражается через приращение давления.

В случае фильтрации слабо сжимаемой жидкости в упруго деформируемой однородной пористой среде, когда относительные изменения параметров этой среды и жидкостей малы, можно считать производные их по давлению постоянными.

$$d\rho / dp = k_{\rho}^{-1} * \rho_0$$
; $dm / dp = k_m^{-1} * m_0$

причем $(p - p_0)/k_m \ll 1$; $(p - p_0)/k \rho \ll 1$ во всем диапазоне изменения давления. Значения k_p имеют порядок 10 ${}^4M\Pi a$, а ΔP в задачах нестационарной фильтрации от 0 до 20 $M\Pi a$. Зависимость проницаемости от давления может быть существенной для процессов, происходящих в призабойной зоне, где велики перепады давления, или для весьма длительных процессов [2,3].

Оценки механических параметров консолидированных пористых сред, обусловлены изменениями внутрипорового давления.

Первичное истощение пласта, добыча при постоянном давлении и многочисленные операции, совершающиеся в процессе разработки нефтегазовых месторождений, сопровождаются значительными колебаниями внутри порового давления продуктивного пласта. Эти колебания следует оценивать с точки зрения их влияния на внутрипластовые напряжения, общие деформации пористой среды, ведущие к сжатию пластового коллектора, проницаемость и, наконец, деформации земной поверхности и ее оседание.

Для эксплуатационников особую важность имеет изменение изменения пористости и проницаемости коллектора в процессе истощения. Теория упругости пористой среды М.А. Биота позволяет выявить связь между внутри поровым давлением и суммарными напряжениями и деформациями пористой среды и объяснить возникающие при этом механические и гидравлические явления [4].

Напряжение воздействующее фактически на поровый скелет и вызывающее глобальную деформацию є *і ј* называется действующим (фактическим) напряжением [2,3,4]

$$G_{ij}^{ejt} = G_{ij} - a P_n v_{ij}$$

Коэффициент Биота *а* показывает, во сколько раз поровое давление снижает действие суммарного напряжения на скелет. Понятие действующего напряжения позволяет использовать измененную G_{ij}^{eft} вместо G и P_n при расчете глобальных деформаций. (G_{ij}^{eft} – действующее напряжение; G_{ij} – суммарное напряжение; P_n – внутрипоровое давление, v_{ij} – коэффициент Кранкера).

В условиях сложной гомогенной и изотропной матрицы изменение пористости пропорционально разности давлений.

$$\Delta \Phi / \Phi = - 1/C (\Delta P_c - \Delta P_n),$$

где Φ – пористость, P_c – давление всестороннего сжатия; $C = 1/V[aV_j/P_n]P_c$ – сжимаемость массива, V_j - поровый объем.

Экспериментально установлено, что изменению порового объема, общего объема и пористости, соответствует своя закономерность изменения действующего напряжения, характеризующаяся, в частности, процентным соотношением всестороннего сжатия и внутри порового давления [4].

Список литературы: 1. Баренблатт Г.М., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М. Недра, 1984. 2. Бажал А.И., Бажал А.А., Сарафанова М.А. Обеспечение жидкостной проницаемости горных пород на месте их залегания с помощью силовых волн. «Высокие технологии в машиностроении», Национальный технический университет (ХПИ), 2/2007. 3. Бажал А.И., Бажал А.А., Сарафанова М.А., Управление структурными и технологическими свойствами горных пород с помощью силовых волн от камуфиетного взрыва. «Высокие технологии в машиностроении», Национальный технический университет (ХПИ), 2/2007. 4. Лоран Ж., Кеттье Л. Поведение пористых консолидированных сред в упругой области. «Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. М. Мир, 1994.

Поступила в редколлегию 01.07.2009

А.Г. Деревянченко, д-р техн. наук, Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук, Д.А. Криницын, Одесса, Украина

ПОДХОД К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЙ РЕЖУЩИХ КРОМОК ИНСТРУМЕНТОВ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖАНИЯ ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

An approach of cutting tools edges defects and microdefects recognition with using the different signs of their projections and sections, which are registered with contact and optic sensors, is considered.

Розглянуто підхід до діагностування станів ріжучих кромок на основі розпізнавання дефектів та мікродефектів з використанням ознак, що реєструються контактними та оптичними сенсорами.

Современное автоматизированное производство требует применения высококачественных режущих инструментов и обеспечения условий надежной их эксплуатации путем создания специализированных систем поддержания работоспособности. Основы проектирования высокоэффективных режущих инструментов (РИ) для современных производств изложены в фундаментальных работах П.Р. Родина, Н.С. Равской, Б.А. Перепелицы и других авторов.

При профилировании РИ режущие кромки (РК) рассматриваются как линии заданной геометрии, образуемые в результате пересечения рабочих поверхностей режущей части. После изготовления инструмента и в процессе его эксплуатации РК представляют собой сложные случайные переходные поверхности, пространственное положение, форма и размеры которых с износом РИ непрерывно изменяются. При чистовой обработке состояние РК непосредственно влияет на качество обработки. Возникновение следов концентрированного износа (локальных – проточин и периодических – канавок) часто приводит к отказам. Появление этих дефектов на формообразующем участке режущих кромок непосредственно (а на остальных участках РК — косвенно) влияет на точность обработки и шероховатость поверхности детали. Притупление РК приводит к потере способности инструмента срезать малые припуски. Поэтому очевидна необходимость разработки подходов, методов и систем автоматического диагностирования состояний режущих кромок. Их отработка, как правило, начинается со стендовых исследований.

Целью настоящей статьи является изложение элементов подхода к диагностированию состояния режущих кромок РИ (резцов) на основе информации, формируемой контактными и оптическими датчиками на соответствующих стендах.

Предложено выполнять диагностирование (распознавание) текущего состояния режущих кромок на основе определения многоуровневого набора характеристик, включающего: 1. параметры формы и пространственного положения формообразующего участка РК и его элементов, определяемые в инструментальной системе координат; 2. классы и параметры дефектов РК (единичных и периодических); 3. параметры микрогеометрии режущих кромок (в том числе - максимальное и среднее значения величины радиуса округления (Р) вдоль активного участка РК). Такой подход соответствует концепции многоуровневого иерархического диагностирования состояний режущей части инструмента [1], предусматривающего поуровневое распознавание макродефектов, дефектов и микродефектов РИ.

При проведении исследований использовались система технического зрения (СТЗ) [1] и стенд, схема и общие виды которого приведены на рис.1, 2.



Рис. 1 – Схема и общий вид стенда (аппаратно – программного комплекса) для формирования первичных образов поверхностей РИ – профилей (сечений, проекций) и топограмм контактным методом

Стенд предназначен для формирования контактным методом первичных образов поверхностей режущей части РИ – "сечений" поверхностей, проекций режущих кромок. Он создан на базе стандартного профилографа – профилометра (1). Подход к регистрации проекций и сечений режущих кромок с использованием профилографа формировался на основе материалов, изложенных в работе [2].

Фрагмент общего вида стенда, отображающий непосредственно зону контроля, приведен на рис. 2.



Рис. 2 – Фрагменты общего вида стенда для формирования первичных образов поверхностей РИ контактным методом

Объектом контроля инструмента является одна из контактных поверхностей (A^{T}) режущей части (L^{T}) изношенного инструмента или его элемента (например - ТНП). Контролируемый РИ размещали в устройстве ориентации 3, которое крепится на крестовом столике 2, смонтированном на столе профилографа 1. Щуп датчика 4 (алмазная игла с коническо-сферической вершиной; радиус при вершине - 2 мкм) контактирует непосредственно с поверхностью РИ. Плоскость, проходящая через ось щупа и ось датчика (или – через вектор скорости датчика, втягиваемого в корпус мотопривода 5) и является плоскостью "сечения" контролируемой поверхности РИ.

Сигнал от датчика поступает в электронный блок 6 (на рис. 1 не показан), где усиливается и проходит предобработку. На ленте самописца 7 в реальном масштабе времени (в процессе записи) отображается профиль поверхности (профиль сечения), увеличенный в 2 – 10 тысяч раз. Масштаб увеличения определяется размерами объекта регистрации.

Указанный профиль является элементарным первичным образом ($\breve{Q}_{14}^{A_{1}}$) - отображением контролируемой поверхности РИ (, Для ввода в ПЭВМ (9) использовалась следующая последовательность действий: выполнялось сканирование множества профилограмм и сохранение соответствующих изображений ($\breve{Q}_{14}^{A_{1}}$) в накопителе (8), с которого затем производилось считывание информации. Затем выполнялась оцифровка каждой профилограммы с использованием специального программного комплекса,

т.е. формировалось множество элементарных цифровых первичных образов $Q_{14}^{A_{1}^{*}}$.

Регистрацию профилограмм (сечений поверхности - 4) производили как с использованием стандартного шупа, так и специального шупа 13 (рис. 2). В первом случае опора шупа перемещалась по специальной базовой поверхности приспособления 3, во втором – базовая плоскость "наездника" 12 вместе с датчиком перемещалась вдоль сферической вершины винта 11. Стабильность контакта обеспечивало приспособление 14 из оснастки профилографа.



Рис. 3 – Изменение топографии задних поверхностей и состояния режущих кромок по мере износа резцов при точении стали 8XC

С использованием стенда и СТЗ производили контроль и диагностирование дефектов и микродефектов режущих кромок резцов, образующихся при чистовом и тонком точении, с определением комплексов параметров и диагностических признаков. Контроль выполнялся в моменты прерывания обработки.

На рис. 3 приведены графики нарастания максимальной ширины износа задней поверхности () и схемы, отображающие изменения структуры элементов задней поверхности и РК резцов по мере их износа.

Одной из особенностей состояния изношенного резца при тонком точении стали является появление специфического дефекта - "опускания" участка режущей кромки вследствие смыкания зон износа по передней и задним поверхностям. При достижении максимальной высоты опускания (^h) порогового значения (0,040 – 0,045 мм) возникает эффект "фонтанирования" стружки, вследствие чего нарушается стабильное стружкодробление. В условиях автоматизированного производства такое состояние, несмотря на возможность инструмента формировать поверхность требуемого качества, является отказом РИ.

Как известно, смещение режущих кромок по мере износа РИ в "тело" инструмента и соответствующее смещение вершины оценивается величиной радиального износа - ^h (рис. 4.a) и параметрами интенсивности его изменения. Параллельно с этим происходит нарушение исходной геометрии формообразующего участка РК, что приводит к существенным изменениям параметров шероховатости обработанной поверхности, в частности - ^R (рис. 4.б).



Рис. 4 – Характер нарастания радиального износа(а) и изменение параметра по мере изнашивания резца (б) при тонком точении серых чугунов

На рис. 5 приведены изображения проточин ($\Pr^{L_{2}^{r}}$) – локальных дефектов на участках передней поверхности ($\stackrel{L_{2}^{r}}{l}$) и режущих кромок ($\stackrel{L_{2}^{r}}{l}$) РИ Их появление приводит к локальным нарушениям геометрии режущих кромок.



Рис. 5 – Изображения проточин – дефектов контактных поверхностей инструментов, возникающих на главной (а) и вспомогательной (б) режущих кромках (виды со стороны передней поверхности резца).

Притупление РК приводит к потере способности инструмента срезать малые припуски, поэтому весьма важно выполнять оценку параметров микрогеометрии РК (в частности - P) и выявлять микродефекты РК. Для этого последовательно формировались наборы сечений РК (рис.6), выполнялось их сканирование и ввод в ПЭВМ. Далее производилась оцифровка и определение комплекса параметров РК с использованием специального программного комплекса. В частности, производилась оценка изменений величины P вдоль активных участков РК (рис. 7).



Рис. 6 – Пример наборов профилограмм – "сечений" участков режущих кромок нового (а) и изношенного (б) резца. Увеличение – 2000. Шаг между сечениями РК – 0,025 мм



Рис. 7 – Изменение радиуса округления РК (¹⁰) вдоль режущей кромки у нового (1) и изношенного (2) резцов. N – номер точки РК; шаг между точками – сечениями РК – 0,025 мм

Контроль достоверности автоматического диагностирования микродефектов режущих кромках удобно выполнять

с использованием аналоговых (рис. 8) или дискретных (O_1^{4}, O_1^{4} - рис. 9) топограмм (3D – отображений, моделей реальных PK). Например, на рис. 9. в, г отчетливо видны периодические следы концентрированного износа, оперативное распознавание которых производится по цифровым проекциям и изображениям PK с использованием методов вейвлет – анализа и фракталов.



Рис. 8 – Аналоговая топограмма участка режущей кромки резца. Масштабные шкалы заданы в мкм.

 $L_{1}^{0}, L_{2}^{0}, L_{1}^{0}$ - соответственно передняя, задняя поверхности и РК

После отбора наиболее информативных признаков состояний РК формируется пространство признаков для каждого уровня диагностирования. Распознавание классов дефектов РК выполняется с использованием статистических методов и нейронных сетей.

Проведенные исследования, по мнению авторов, свидетельствуют о перспективности использования разработанного подхода к многоуровневому диагностированию состояний режущих кромок РИ в системах поддержания работоспособности современных автоматизированных производств.



Рис. 9 – Фрагменты дискретных топограмм (а, в) и соответствующих карт уровней (б, г) участков РК резцов. UVW – локальная система координат, задаваемая измерительной системой на участке РК (отсчеты - в дискретах регистрации)

Список литературы: 1. Подход к многоуровневому диагностированию состояний режущей части инструмента / А.Г. Деревянченко, Л.В. Бовнегра, З.Б. Василевская,

В.В. Ткачук // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ "ХПИ".— Харків, 2006. Вип.1(12) — С. 137 – 140. 2. Основы алмазного шлифования/ Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф., Узунян М.Д., Пивоваров М.С.- Киев.: Техніка, 1978. – 192 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2009

I. Elyasi-Komari, PhD St., National Aerospace University, Iran A.G. Mamalis, Dr-Ing., National Technical University of Athens, Greece S.N. Lavrynenko, PhD, National Technical University "KhPI", Ukraine

THE ANALYSIS OF TASKS OF DEVELOPMENT AND REENGINEERING PROCESS OF RELIABILITY COMPUTER NETWORKS FOR CRITICAL TECHNOLOGIES

The analysis of tasks of development and reengineering of computer networks of information-control (I&C) systems of critical technologies (CT) using opened network technologies and the commercial network equipment is executed. Formal tasks of development and reengineering of computer networks I&C systems of CT are formulated and the initial data, necessary for their decision are analyzed. The principles of profile formation bases of the computer networks based on open standards, variants of a network structure and their choice are considered in view of the requirements showed to reliability, quality of service, to functional and other characteristics of computer networks. These procedures can be realized as the tool utilities, which allowing to automate the process of computer systems designing.

Keywords: Computer networks, critical technologies, reverse engineering, reengineering, reliability improvement, computer systems profiling

Зроблено аналіз задач розвитку і реінжиніринга комп'ютерних мереж інформаційного контролю (I&C) системи критичних технологій (СТ), що використовують відкриті мережні технології і комерційне устаткування. Формальні задачі розвитку комп'ютерних мереж I&C системи СТ сформульовані, початкові дані, необхідні для їхнього рішення проаналізовані. Принципи формування профілю комп'ютерних мереж, заснованих на відкритих стандартах, а також варіанти структури мережі і їхній вибір розглядаються в розрізі вимог до надійності, якості обслуговування, до функціональних і інших особливостей комп'ютерних мереж. Ці процедури можуть бути зрозумілі як інструментальні утиліти, що дозволяють автоматизувати процес проектування.

1. Introduction

The solution of the traditional problems, connected with the analysis of time characteristics and calculation probability of non-failure operation of modern computer networks, their optimization, distribution of information streams and structural synthesis in practice is connected with a number of problems.

First of all, it's a problem of a computer network dimension, which especially seriously comes now, when the computer network, even concerning the small enterprise or establishment, can unite from several tens, up to hundreds of computers.

Next problem is profiling of computer networks. Introduction of a technique of profiling in process of computer systems designing is one of conditions of protection against inefficient network decisions which do not meet showed requirements to functional, reliability and to other computer systems characteristics.

Other problem is a problem of uncertainty, which consists in absence of some authentic data for calculations and complexity of their prediction, for example intensity of information streams between the computers in a network. Moreover, the information traffic of modern computer networks is dynamic and is characterized high "explosion alike", i.e. high value of the pulsations coefficient determined as the quotient of the maximal traffic in a network to its average value.

As consequence, some from traditional tasks of the analysis and synthesis of computer networks now do not find practical application as do not reflect a modern level of development of network technologies and the existing network equipment.

Modern computer networks is the complex hierarchical systems constructed on the basis of the commercial network equipment and the software, which correspond to open standardized network technologies.

By results of the analysis which has been lead by firm « IBM Consulting Group » [1], 68 % of network projects exceed scheduled terms, 55 % exceed the scheduled budget, thus of 88 % pass through procedure of repeated designing. Introduction of a technique of profiling in process of designing KC is one of conditions of protection against inefficient network decisions which do not meet showed requirements to functional, reliability and to other characteristics of computer networks, and also restrictions at cost and terms of designing.

Tasks of choosing a route for transferring the information effectively enough are solved by means of standardized reports of routing, which provide an optimality of the chosen route (by various criteria), dynamic reaction to a condition and availability of liaison channels, are characterized by high speed of convergence and provide balance of loading on several routes.

Another bright example is that at use of modern high-speed technologies (speed of transfer up to 10 Gbit / and more) for construction of territorially distributed computer networks the delay of transfer of the information is determined mainly by speed of distribution of an electromagnetic signal in a liaison channel, but not by bit speed of transfer.

At the same time, today we see the tendency of application of the modern network technologies based on opened standards, at designing and modernization of info-control systems of critical technologies (I&C S CT), for example, in atomic energy [2, 3].

FME (C) A (Failure Modes, Effects (and Criticality) Analysis), allowing to present as the systematized list the information on the reasons and kinds of refusals for various component of I&C S CT and their consequences. It can be applied also to support of processes of reengineering of systems which can assume functional, topological and reliability components [4], classification of the Service-Oriented Architecture specific errors and failures, Web Services Development Toolkits [5].

This fact causes an urgency of the new tasks connected with the development and reengineering of computer networks for critical applications at usage of opened standardized network technologies and the commercial network equipment, the analysis and maintenance of their conformity to regulating and normative requirements [6].

The purpose of article is the analysis of development problems and reengineering of computer networks of critical application, profiling of standards of computer networks, which is directed on perfection of process of designing, and formulation of the formalized tasks of their synthesis at usage of opened network technologies.

2. The analysis of initial data for solving tasks of development and reengineering of computer networks

Process of developing the computer networks, based on opened standards, is quite complex and requires to take into account different factors, such as the information about quantity and arrangement of computers (subscribers of a network),

requirements of the customer and normative documents, conditions of network standards and also a number of limiting factors, including

Cost of designing and exploitation of the network, provided level of reliability and quality of service.

Results of the analysis of the initial data, necessary for the solution tasks of development and process reengineering of computer networks are shown in fig. 1.



Fig. 1 - The initial data used during development

and process reengineering of computer networks The initial data include set of computers, $HOST = \{hi\}\)$ - final units of the future computer network, the circuit of their physical accommodation and a function chart (I&C system architecture), reflecting functional connections and character of interaction between separate computers of information system and their groups. Geographical coordinates of each computer define its site on the circuit of physical accommodation, PhS, and are set by ensemble $\{x_i, y_i, z_i\}$. The function chart, FS, is set usually in any shape with the help of figures and the text description, however can be formally submitted as crossed functional subsets of ensemble HOST:

$$\begin{split} & \mathrm{FS} = \big\{ F_i \big\}, \, F_i \, \subseteq \mathrm{HOST} \\ & F_i \cap F_j \neq \varnothing, \, i \neq j \end{split} \label{eq:FS}$$

In some cases as entry conditions can be determined earlier established network components.

After the analysis of functional structure, proceeding from function, application domains and requirements of normative documents, requirements to a projected network are formed - R, including requirements to functional characteristics of a network, the requirement to reliability and quality of service:

$$R = (R_{FUNC.}, R_{REL.}, R_{QUAL})$$

On the basis of the analysis of initial data from all set of standards of the computer networks, which make "type forming" base, the choice of the concrete network reports and technologies is being in progress (i.e. the structure of a network is being formed - PR_{NET}) [4], the logic structure of a network is being developed, LS, the nomenclature of the corresponding network equipment is being defined - HW, the software - SW and the basic physical circuit of a network - PhS, which establishes interrelation between the network equipment with binding to geographical coordinates of its accommodation is being formed.

The software of computer networks generally can be divided into earlier developed system - SYS and applied commercial - APP, and also applied specialized - SPEC. Hardware maintenance represents a set of the typical network equipment, including elements of cable system - SCS, concentrators - HUB, switchboards - SWITCH, routers - ROUTER, the network adapters placed in computers - NET CARD, etc.

HW = (SCS, HUB, SWITCH, ROUTER, NET CARD)

Each unit of the network equipment included into one of the specified subsets, except a set of characteristics, the common for the given type of devices, can have a set of individual properties, for example, the concrete model of a router is characterized by the certain quantity and type of ports of the connection, used reports of routing, algorithms of priority processing of packages, algorithms of processing the overloads, etc.

3. Criteria of optimization in tasks of development and reengineering of computer networks

By development and modernization of computer networks it is necessary to consider the fact, that all variety of standards of the network technologies, included into the structure of "type forming" base, forms coherent multilevel hierarchy (in a classical case - seven-layer, according to levels of conceptual model of opened systems interaction - OSI). Each of levels carries out the certain functions by organization of interaction between final computers and has a set of corresponding characteristics, which should be considered while choosing this or that network technology or the report.

Financial expenses by designing a computer network - *C* include cost of the purchased equipment and the software, and also an expense for performance of starting-up and adjustment works (installation of the network equipment, adjustment of hardware and software, etc.). Besides the computer network demands constant financial expenses while it's servicing for administration, repair or replacement of broken equipment and modernization of a computer network.

As the basic criteria of optimization at designing modern computer networks the following can be allocated:

1) Quality of service;

2) Reliability of functioning;

3) Cost of development and exploitation.

For I&C S CT computer networks the task of optimization by criterion of cost is characteristic at the set level of reliability and the certain requirements to maintenance of service quality. Thus requirements of reliability and quality are expedient concretized by levels of network model of interaction OSI proceeding from features of each level.

In tab. 1 the basic methods of maintenance of reliability and quality of service, which are necessary for taking into account and using at designing computer networks, are submitted.

Table1 - The basic methods of maintenance of reliability and quality of service in computer networks

Methods of maintenance of reliability	Methods of maintenance of quality
Methods of maintenance of reliability Reports with an establishment of connection and acknowledgement for protection from distortion, loss and duplication of the staff (packages). Hardware and reports of diagnostics and reconfiguration of network at refusals and failures; Algorithms of noiseproof coding. Reservation of liaison channels, network adapters and ports of the communication equipment; Application of the shielded and fibre-ontical	Methods of maintenance of quality Maintenance of overlapping throughput and non-blocking switching (routing); The determined methods of plural access; Priority processing the staff (packages) in switchboards and routers; Reservation of resources of switchboards (routers) and a guarantee of characteristics of quality
adapters and ports of the communication equipment;	
Algorithms of noiseproof coding. Reservation of liaison channels, network	quality
Application of the shielded and fibre-optical cable for protection against electromagnetic handicaps	

Reengineering of I&C S CT computer networks can be completed with the purpose:

1) Increase of reliability and quality of service;

2) Expansion of functional characteristics;

3) Expansion of a computer network (support of the greater number of subscribers);

4) Increase in scale of a computer network.

Result of development or reengineering is the unique computer network adequate to given requirements and constructed according to standards of existing network technologies with usage of typical communication devices and network software developed earlier.

4. Technique of profiling

4.1. The analysis of a problem of computer networks profiling

The computer networks are the integral part of modern information and control computer-based systems. The main function of computer networks is the transmission of information between a geographically-distributed computers and access providing to a shared network resources. For implementation of this function in the I&C S CT, i.e. aerospace computer-based systems, I&C NPPs, etc., traditionally the specialized networks were developed and used. However recently, within the framework of the COTS-approach ("Commercial off the Shelf"), the tendency to usage of commercial network equipment and software based on open standardized network technologies for I&C S CT was outlined. The tasks of the reliability ensuring of computer network based on the open standards and models (for example, the OSI or TCP/IP models) and used for critical technologies according to the COTS approach [7] are decided at various layers of these models.

Introduction of a technique of profiling in process of computer networks designing is one of conditions of protection against inefficient network decisions which do not meet showed requirements to functional, reliability, and to other computer networks characteristics, and also restrictions at cost and terms of designing.

Development of elements of a profiling technique of standards of computer networks, which is directed on process perfection of computer networks designing by formalization of a choice procedures of network technologies, hardware and computer network software.

The purpose of this report is the correspondence analysis between possibilities of the open standardized network technologies and normative requirements to the I&C S CT, and also development of a method of profile design and reliability assessments of computer networks for critical applications.

4.2 Principles of profiling. Formation of profiling bases of computer networks

Profiling is one of effective methods of positions harmonization of various normative documents and their adaptations to concrete information projects [8,9]. Main principles of construction of the OSI -structures of information systems, including the computer networks based on open standards, are incorporated in normative documents ISO/IEC TR 10000-1,2 [10]. According to these documents the developed structure should have ypoBHeByło the hierarchy corresponding to a conceptual model of the open systems interaction. The concrete set of the standardized network technologies used in this or that computer network, forms a structure of this network.

Now there is a plenty of the network technologies used for construction of computer networks. Their variety explains an urgency of profiling creation the base including the most full set of systematized standards of network technologies. Thus, creation several specialized (on type or scale of a network) profiling bases, for example profiling bases of network technologies of local and separately global networks can be expedient.

The standards of network technologies included in profiling base structure, can be systematized according to the accepted hierarchy of levels of reference model of the OSI. For this purpose the profiling base network can consist of vertical hierarchy of profiling bases on each of levels of the OSI model. Thus each of levels can be detailed on some sublevels, according to

functional interrelation of network standards, which included in it:

$PB_{MRT} = PB1 \cup PB2 \cup PB3 \cup PB4 \cup PB5 \cup PB6 \cup PB7$

Where PBNET - full profiling base network uniting set of all standards of network technologies; PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7 - profiling bases on levels of conceptual model of the open systems interaction, containing a set of standards of the network technologies concerning to each concrete level.

As a result of the analysis and ordering of existing standards of network technologies the base, which fragment is shown on fig. 2 has been received by profiling.

4.3 Formation and a choice of variants of a network structure

The multilevel approach, based existing network models, assumes independent interaction of the reports which are taking place at different levels of models. However, in practice realization of the "protocol-independent principle" is carried out far from being always, that it is necessary to take into account in selection of the network technologies from of the profiling bases. The analysis of an opportunity of various network standards sharing can be executed by experts in the field of network technologies, and the result of such analysis is submitted in harward graphs, which supplement each other. For this purpose it is offered to use profiling graph G_{PROF} , which tops are the standards included in profiling base while edges set a condition of compatibility between standards according to the information contained in matrix M_{COMP} , and also restrictions, superposable on the previous variant of a choice. The structure profiling the graph is submitted on fig. 3.

Levels of model OSI		Network	service	s, sta	anda	unds o	ofne	tworl	k techno lo	gies	പ	dpr	ntoc	cok
7-applied	в	E-m	E-mail		File transfer			Analysis and management		t	S I fur		cia fior	l 15
/-appned	A	FTP	SMT	P	PO	ß	IM.	AP4	SNMP					
6-representation												NCI		SAP
5-session			тер			ITTOP								
4-transport			ICF					ODF		SF	X			
3. metarork	В				IF	2						IPX		
A		RIP	RIP OS		OSI	PF		E	EIGRP		RIPIP		NI	SP
2-channel		802.3	802.3	3u 802		3z	- 80	2.5	802.12	F	DD	II	DI	DI-II
l-physical		UTT	3	UTP5 STPe		STP6			01	FC 6.	2,51	125		



Fig. 2 – The fragment of profiling bases of computer networks

Fig. 3 – Structure of profiling graph G_{PROF}

The routes connecting the uppermost and bottom tops the column and distinguished even by one edge, form set of alternative variants of a network structure. These variants are convenient for fixing as matrix M_{PROF} , dimension KxM to which lines

corresponds k-variants of a network structure, and столбцам - m-standards of network technologies and reports k O I, K. $m O \overline{1, M}$

The choice of this or that variant of a network structure should be based on the analysis of the initial data (diameter of a network, quantity of computers - subscribers of a network, etc.), and also the requirements showed to functional characteristics of a projected network, reliability and quality of service.

The generalized algorithm of a choice includes the following operations: 1. The cycle on levels (sublevels) of the OSI model from top to down is carried out.

2. At a level 7-B it is fixed the tops determining necessary kinds of network services. Further at each level the graph is carried out consecutive tops.

3. For each top of the *i*-th level the subset of adjacent tops (network standards), belonging to underlaying levels among which gets out unique, satisfying showed requirements is analyzed. 4. Staying non-withdrawn tops and incidental it edges leave from the graph G_{PROF} .

Received as a result of the listed operations a graph G' (being a part of the graph G_{PROF}) corresponds to the variant of a structure chosen according to showed requirements

5. Formalization tasks of development and reengineering of computer networks

On the basis of the made researches can be formulated following optimization tasks of development computer networks for I&C S CT:

	Functionality $(PhS, SW, HW) = R_{\mu\nu\nuc}$	$[Functionality(PhS, SW, HW) = R_{FUNC}]$
	Reliability (PhS, SW, HW) = R_{BBT}	Reliability (PhS, SW, HW) \rightarrow max;
1	Quality of service (<i>PhS</i> , <i>SW</i> , <i>HW</i>) = R_{guas}	Quality of service (<i>PhS</i> , <i>SW</i> , <i>HW</i>) \rightarrow max;
	$\operatorname{Cost}(PhS, SW, HW) \rightarrow \min$.	Cost(PhS, SW, HW) = C.

The general task of reengineering of computer networks can be written down as:

Functionality (PhS, SW, HW) = $R_{PONC-NEW}$ Reliability(PhS, SW, HW) = R_{EFL-NEW; Quality of service (PhS, SW, HW) = $R_{gual-NEW_3}$ Measure of network (PhS, SW, HW) = L_NEW: Number of computers (PhS, SW, HW) = N_{MPW} $Cost(PhS, SW, HW) \rightarrow min.$

Conclusions

In the article the analysis of tasks of development and reengineering of computer networks info-control systems of critical technologies with usage of opened network technologies and the commercial network equipment has been made.

Formal tasks of development and reengineering of I&C S CT computer networks have been formulated and the initial data, necessary for their decision have been analyzed.

The profiling base has the multilevel architecture corresponding to conceptual model of the OSI.

Various variants of a network structure and their choice in view of the requirements showed to reliability, quality of service, to functional and other characteristics of computer networks. Besides the offered technique of profiling can be added with results of the analysis of conformity of various variants of structures of the computer networks constructed under open standards, requirements to control systems of critical objects, for example, to informational-managing systems of the nuclear power plants [12].

The further researches can be directed on the way of detailed elaboration of the formulated tasks considering the concrete applied area and development of methods for their accomplishment.

References: 1. Olifer N.A., Olifer V.G., Hramtsov P.B., Artemjev V.I., C.D. Smiths. Strategic planning of networks of scale of the enterprise. The manual // <<u>http://www.citforum.ru/nets/spsmp/index.shtml></u>, © the Center of Information Technologies. - Moscow, 1997. 2. Data-processing system of the power unit № 2 of the Khmelnitskiy Nuclear Power Plant IVS " Complexes - XAЭC2 ": the Technical project 14072049.51500.052.TZ: the State enterprise the Kharkov scientific research institute of complex automation (KhICA). - Kharkov, 2000. - 151 p. 3. *Kharchenko V.S., Jastrebenetskij M.A., Sklyar V.V.* (2003) New information technologies and a problem of safety of information-control systems of the Nuclear Power Plant. Nuclear and radiating safety №2, P. 19-27. 4. *Elyasi Komari Iraj, Anatoliy Gorbenko*. FME (C) A-Technique of Computer Network Reliability and Criticality Analysis. // Proceedings of IEEE East-West Design and Test Workshop, Conference, Sochi, Russia, September 15-19, 2006. - P. 202-205. 5. *Anatoliy Gorbenko, Elyasi komari Iraj, Vyacheslav Kharchenko, Alexey Mikhaylichenko*. Exception Analysis in Service-Oriented Architecture. // GI-Edition, Proceedings. 6th International conference (Information Systems Technology and its Applications, ISTA, May 23-25, 2007, Kharkiv, Ukraine. Volume P-107, - P.228-233. 6. *Kharchenko V.S., Gorbenko A.V., Sklyar V.V.* (2004) Computer networks of information and managing systems of the Nuclear Power Plant, constructed on the basis of opened standards. Nuclear and radiating safety №4, - P. 80-87. 7. *J.M. Voas* (1998.) The Challenges of Using COTS Software in Component-based Development. Computer 31:6, -P. 44-45. 8. *Kharchenko V.S., Shostak I.V., Manzhos Ju.S., Sklyar V.V.* Formation and verification of normative structures of the critical software with use of knowledge aligned methods // Scientific transactions of the Donetsk National Technical University "Computer techniques and automation", 2002. - Iss. 47, - P. 233-239. 9. *Gladun* Sklyar V.V. Formation and verification of normative structures of the critical software with use of knowledge aligned methods // Scientific transactions of the Donetsk National Technical University "Computer techniques and automation", 2002. - Iss. 47, - P. 233-239. **9.** *Gladun A.J., Perevozchikova O.L., Pleskach V.L.* Development of OSI-structures of open systems // Managing systems and machines, 2000. - $N \ge 2$. - P. 58-70. **10.** ISO/IEC TR 10000-1, 2. Information technology - Framework and taxonomy of International Standardized Profiles - Part 1: General principles and documentation framework, Part 2: Principles and taxonomy for OSI profiles. - Geneva, 1998. - 13 p. **11.** *Gorbenko A.V.* (2004) A method of a choosing structures of computer networks for critical appendices . Herald of Manufacture university Podillya Science magazine $N \ge$, Part. 1, T.2, - P.:46 - 49. **12.** *Yastrebenetsky M.A.* (*ed.*), *Rozen Yu. V., Vilkomir S.A., Kharchenko V.S. et al.* NP 306.5.02/3.035-2000. Requirements of Nuclear and Radiation Safety to NPP I&C Systems Important to Safety. - Kiev: Nuclear Regulatory Administration of Ukraine. 2000. - 85p. Administration of Ukraine, 2000. - 85p.

Поступила в редколлегию 15.05.2009

Ю.Д. Филатов, д-р техн. наук, Киев, Украина

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ШЛАМА И ИЗНОСА В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

It is established, that at interaction of not charged particles of deterioration and particles u_{AAA} they dissipate on corners $80-140^{\circ}$ and of 50 nm move on circular trajectories in diameter. The charged particles of deterioration dissipate on corners 152–175⁰ and of 150 nm move on channels in diameter.

Введение. Состояние проблемы контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при полировании неметаллических материалов (HM) характеризуется решением вопросов, связанных с изучением механизмов диспергирования частиц шлама и их распределения по размерам, исследованием закономерностей формообразования прецизионных поверхностей и управлением точностью их формы за счет оптимизации кинематических и режимных параметров процесса и выбора функционально-ориентированных конструкций и характеристик рабочего слоя инструмента, разработкой методов расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и компьютерного моделирования микро- и макрорельефа взаимодействующих поверхностей детали и инструмента. В настоящее время для процессов алмазного шлифования НМ на основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама [1], а также результатов исследования динамики их столкновений и рассеяния в контактной зоне определены параметры шероховатости плоских прецизионных поверхностей и их координатная зависимость, а также обосновано образование налета частиц шлама на рабочей поверхности инструмента [2]. Процессы взаимодействия частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования изучены [3, 4] в предположении отсутствия частиц износа инструмента, как при шлифовании [2], а причины возникновения налета частиц шлама и частиц износа рабочего слоя инструмента на взаимодействующих поверхностях не выяснены окончательно. Только на основе изучения взаимодействия частиц шлама и износа в контактной зоне можно выяснить особенности формирования микрорельефа поверхностей обрабатываемой детали и рабочего слоя инструмента.

Закономерности взаимодействия частиц износа инструмента с частицами шлама в зоне контакта. Концентрации частиц шлама в точке с координатой z (по нормали к обрабатываемой поверхности) при полировании определяется, исходя из физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама [1], в соответствии с формулой:

$$c_{i}(z,\tau) = n_{0i} \left(1 - \frac{1}{erf(\beta_{i})} erf\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_{i}\tau}}\right) \right)_{i}$$

где: n_{0i} – число *i*–х частиц шлама на обрабатываемой поверхности, $\eta_i(\rho)$ – коэффициенты объемного износа, τ – время

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{x} e^{-t^{2}} dt$$

полирования,

(1)

рования, $\sqrt{\pi} \stackrel{0}{_{0}}$ – интеграл ошибок, $i = \overline{0, n-1}$ – номер группы частиц, n – число групп [4]. Коэффициенты объемного износа зависят от размеров d_i частиц шлама и времени τ_c их контакта с поверхностью инструмента в соответствии с формулой $\eta_i = d_i^2/4\beta_i^2 \tau_c$, а коэффициенты β_i являются решениями *n* трансцендентных

уравнений [1]:

$$\frac{e^{-\beta_i^2}}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta_i)} = \frac{L_t}{n_{0i}S_i} \sqrt{\frac{\lambda T\tau_c}{p_a}},$$
(2)

где p_a – номинальное давление прижима инструмента к детали; L_t – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; *Т*=300 *К* – температура; *S_i* – площадь поверхности *i*-й частицы [1].

При полировании плоских поверхностей деталей из стекла диаметром 60 мм инструментом диаметром D₁=60 мм, рабочий слой которого выполнен в виде 12 полировальных элементов Аквапол ЭП1 диаметром d₁=10 мм, на шлифовально-полировальном станке типа ШП номинальное давление прижима составляло $p_a = 0.05$ МПа, а частота вращения детали $\omega_1 = 20.9 \text{ c}^{-1}$ (200 об/мин). Параметры и характеристики стекла марки К8: плотность $\rho = 2.52 \cdot 10^3$ кг/м³; $\lambda = 0.95$ Bt/(м·K); энергия связи – 3.9 эВ (90 ккал/моль); энергия кластера – 5.3 эВ; количество фрагментов O=Si=O в кластере ξ = 96; значение константы Лифшица ω_{123} =1,36·10¹³ с⁻¹; параметр распределения частиц шлама по размерам (распределения Пуассона) – v = 0,74). Площадь поверхности частиц шлама определена, исходя из кластерной модели, по формуле $S_i = S_0(i+1)$, в которой $S_0 = (\xi/2)L_x^2 + 8\xi^{1/2}L_xL_y$, а L_x и L_y – расстояния между соседними фрагментами на поверхности и между слоями фрагментов соответственно [5]. Наиболее вероятный размер частиц шлама $a_v=3,2$ нм; концентрация частиц шлама – $2,2\cdot10^{23}$ м⁻²·c⁻¹, длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента $L_t = d_t$; скорость его относительного перемещения $u = \omega_1 D_1/4$; время контакта с поверхностью зерна полировального порошка (CeO₂, $d_g=1$ мкм) $\tau_c=d_g/u$.

При решении численными методами *n* уравнений (2) и определяя коэффициенты объемного износа η_i , была рассчитана концентрации *i*-х частиц шлама $c_i(z_0, t)$ и число частиц шлама на площади контакта инструмента и детали 6,1·10¹³. Наиболее вероятный объем частицы шлама составляет v₁ = 17,3·10^{-27 м3}. Производительность полирования стекла марки К8 при данных условиях, рассчитанная по величинам концентрации частиц шлама $c_i(z = R \max, \tau = 1)$ с учетом их пуассоновского распределения по площадям поверхности, составляет 1,19·10⁻¹¹ м³/с и

незначительно отличается (погрешность расчета 11,9 %) от экспериментального значения 1,06·10⁻¹¹ м³/с (линейный съем – 1,6 мг/мин или 0,225 мкм/мин – в средней зоне обрабатываемой поверхности).

Образовавшиеся за время одного оборота детали частицы шлама имеют суммарный объем 3,18·10^{-12 м3}. Объем частиц, расположенных на площади контакта инструмента и детали, составляет 1,06·10^{-12 м3}, а объем контактной зоны 5,7 10^{-10 м3}. Для расчета концентрации и размеров частиц износа инструмента, исходя из экспериментального значения величины относительного износа инструмента f = 0,9, находились значения линейного износа инструмента $\Delta S = 3,4\cdot10^{-9}$ м и суммарного объема частиц износа 9,5·10-13 м³, образовавшихся за время 1 оборота детали. Исходя из кластерной модели [5], значений атомной массы диоксида церия $M_2 = 172$ и его плотности $\rho_2 = 6,7\cdot 10^3$ кг/м³, рассчитывались количество фрагментов CeO₂ в частице износа ξ = 117, энергия кластера 6,75 эВ, объем частицы износа 15 нм³, средний размер $d_2 = 3,06$ нм и число частиц износа $6,4 \cdot 10^{13}$. Общее число частиц шлама и износа в контактной зоне – 1,25·10¹⁴, а объем зоны на 1 частицу составляет 4,5·10^{-24 м3}. То есть в элементарном объеме 16,5x16,5x16,5 нм³ находится одна частица, причем в контактной зоне частиц износа приблизительно столько же как и частиц шлама, а среднее расстояние между ними составляет $l \approx 16,5$ нм, что в 5 раз больше, чем средний размер частиц шлама или износа. Число таких ячеек вдоль оси z (число слоев) составляет $(l_0 - z_0) / l \approx 36$.

Исходя из проведенного анализа, можно определить координаты частиц шлама $z_i = z + d_i/2$ и частиц износа z_2 $= z + d_2/2$ (di – размер i-ой частицы шлама), их концентрацию в соответствии с формулой (1) за время 1 с на плошали

$$n_i(z) = c_i(z + \frac{a_i}{2}, \tau = 1)$$
, а также изучить закономерности столкновений и рассеяния частиц износа.

Рассмотрим сначала взаимодействие частиц износа инструмента с частицами шлама в контактной зоне на основе известных закономерностей динамики молекулярных столкновений и классической теории рассеяния частии [6] с учетом, что электрический заряд частиц отсутствует, а потенциал их межмолекулярного взаимодействия выражается формулой

$$U_{i}(x) = -\frac{\hbar\omega_{123}}{8\pi x} \cdot \frac{d_{i}d_{2}}{d_{i}+d_{2}},$$
(3)

где \hbar – постоянная Планка. *x* – расстояние между частицами.

 $b_i = \frac{1}{2}(d_i + d_2)$ и кинетическую энергию частицы износа $E_k = \frac{1}{2} \rho_2 v_2 u^2$ Определив прицельное расстояние – объем частицы износа), для двухчастичных столкновений угол θ_i рассеяния можно выразить следующим образом:

$$\vartheta_{i} = \pi - 2 \int_{R\min}^{l_{i}} \frac{b_{i} dx}{x^{2} \sqrt{1 - \left(\frac{b_{i}}{x}\right)^{2} - \frac{U_{i}(x)}{E_{k}}}},$$
(4)

 $R\min = \frac{1}{2}(d_{i=n-1} + d_2)$ - расстояние наибольшего сближения частиц. С учетом распределения частиц шлама по размерам рассчитаны возможные значения угла рассеяния частиц

 $= \frac{1}{n} \sum_{i} \vartheta_{i}$ $=101.4^{\circ}$, минимальное Θ min $= 80^{\circ}$ и максимальное износа при столкновении с ними, а также его среднее Θ max = 140[°] значения.

Определяя эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц износа на частицах шлама $\sigma_i = \pi (d_i + d_2)^2$, можно рассчитать число частиц, рассеянных в телесный угол $d\Omega = 2\pi \sin \Theta d\Theta$ за единицу времени dN [6, 7] $dN = N_{mi}N_2\sigma_i d\Omega$. Из зависимости плотности распределение частиц шлама $\overline{d\Omega}$ от угла рассеяния следует, что

наибольшее количество частиц рассеивается на угол приблизительно 110°. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц износа ^Ф*i* изменяется от 1,0 Тб до 2,4 Тб.

Траектории движения частиц износа рассчитаны в системе координат, связанной с технологической средой, заполняющей контактную зону, исходя из допущения, что они влетают в неподвижную среду, в которой частицы шлама и частицы износа равномерно распределены в ячейках объемом l^3 , с постоянной скоростью u. Методом Монте-Карло рассчитывались углы, на которые отклонялась частица износа при рассеянии на *i*-ой частице шлама. При помощи генератора чисел в соответствии с распределением Пуассона случайным образом выбирался номер m и соответственно определялся угол рассеяния θ_{im} . Величина угла, на который отклонилась частица износа после mстолкновений, определялась формулой

(5)

$$\Delta_{im} = (m+1)\pi - \sum_{m=0}^{m} \vartheta_{im}$$

а ее координаты в системе XOZ (ось OX совпадает со средней линией профиля обрабатываемой поверхности):

$$X_{im} = \sum_{m=0}^{m} l \cos \Delta_{im}, \qquad (6)$$

$$Z_{im} = z_2 + \sum_{m=0}^{m} l \sin \Delta_{im}$$

В результате расчетов показано, что траектории движения нейтральных частиц износа инструмента, которые взаимодействуют с незаряженными частицами шлама, двигаются в технологической среде по круговым траекториям, расположенным в практически недвижимой сфере размерами до 50 нм.

Рассмотрим теперь взаимодействие заряженных положительно частиц износа инструмента с отрицательно заряженными частицами шлама в контактной зоне [5] с учетом, что электрический потенциал их взаимодействия выражается формулой

$$U_e(x) = \frac{e_1 e_2}{4\pi x e_0 e_{03}}$$

где $e_1 = -1, 6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд частицы шлама,

 $e_2 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд частицы износа,

 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/M$ – электрическая постоянная,

ε₀₃ = 81 − относительная диэлектрическая проницаемость технологической среды (воды).

Угол θ_i рассеяния заряженных частиц износа рассчитывается по формуле (4) с учетом суммарного потенциала

 $= \frac{1}{n} \sum_{i} \vartheta_{i}$

межмолекулярного и электрического взаимодействия. Значения угла рассеяния частиц износа: среднее n_{i} = 165°, минимальное Θ min = 152° и максимальное Θ max = 175°. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц износа $\sigma_{i} = 1,0-2,4$ Тб, такое же как и для незаряженных частиц. Зависимость плотности распределение \underline{dN}

частиц шлама d or угла рассеяния – экстремальная, наибольшее количество частиц рассеивается на угол 166°.

Траектории движения частиц износа инструмента – окружности, заряженные частицы CeO₂, взаимодействуя с заряженными частицами шлама (SiO₂), канализуют, двигаясь вдоль кольцевых «каналов», диаметр которых не превышает 150 нм. Время между двумя последовательными столкновениями частиц износа с частицами шлама независимо от их зарядового состояния составляет 32–34 нс.

Выводы. В результате анализа взаимодействия частиц износа инструмента и частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования на основе исследования динамики их столкновений и рассеяния показано, что их эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет 1,0–2,4 Тб. Рассчитанные при помощи метода Монте-Карло траектории движения частиц износа представляют собой окружности. При взаимодействии незаряженных частиц износа и частиц шлама они рассеиваются на углы 80–140° и двигаются по круговым траекториям, расположенным внутри сфер диаметром до 50 нм. Заряженные положительным зарядом частицы износа взаимодействуют с частицами шлама с зарядом противоположного знака, рассеиваются на углы

152–175°, происходит их каналирование – движение по каналам, диаметр которых 150 нм. Частицы износа «перекатываются» в зоне контакта, подобно перекатыванию зерен абразива в классическом процессе формообразования поверхностей по методу притира.

Список литературы: 1. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 58–66. 2. Филатов А. Ю., Сидорко В.И., Филатов Ю.Д. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 6. – С. 48–57.

3. Sidorko V, Novikov M., Filatov Yu. Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Abstracts of International Conference "Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008", Dresden, 23-25 January 2008. – Р. 103. 4. Динамика столкновений и рассеяния частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали при полировании стекла / Филатов Ю.Д., Сидорко В.И.,

Ковалев С.В., Филатов А.Ю. // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение.-К.: НТУУ «КПИ».-2008.- № 52.- С. 201-207. **5**. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия // Сверхтв. материалы. – 1994. – № 3. Ч. 1. – С. 40–43.

6. Эйринг Г., Лин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики: Пер. с англ.– М.: Мир, 1983. – 528 с. 7. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. Посібник.–2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2002. – 392 с.

Поступила в редколлегию 03.07.2009

(7)

(8)

К ЮБИЛЕЮ КАФЕДРЫ «ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ» ОДЕССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

В сентябре 2009 года исполняется 80 лет кафедре технологии машиностроения Одесского национального политехнического университета – одной из старейших технологических кафедр Украины.

НАЧАЛО

Кафедра «Технологии машиностроения» ведет свою историю с 1929 года, когда впервые был произведен набор студентов на специальность «Технология машиностроения» в Одесском политехническом институте. Первый выпуск инженеров-технологов в 1933 году был осуществлен кафедрой «Общего машиностроения», которой тогда руководил д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Виктор Афанасьевич Добровольский (в 1945 – 1957 гг. – ректор ОПИ).

Среди первых выпускников кафедры были: М.Ф. Волохович – будущий ректор ОПИ (1938 – 1941 гг.), И.М. Зальцман – будущий директор Ленинградского Кировского, а затем Челябинского тракторного (танкового) заводов, Герой Социалистического труда, лауреат пяти Сталинских премий, зам. наркома танковой промышленности и многие другие руководители науки и производства.

СТАНОВЛЕНИЕ

С 1939 года кафедра «Технология машиностроения» становится самостоятельным структурным подразделением ОПИ и выпускает инженеров-технологов. Первым заведующим кафедрой стал доцент Л.Д.Шехтер, главный технолог станкозавода им. Кирова, в те годы освоившего выпуск координатно-расточных станков по лицензии фирмы SIPP. Выпускниками кафедры были будущие профессора К.И.Заблонский (ректор ОПИ в 1969 – 1985 гг.), В.Ф.Мальцев, доценты И.Я.Телис, И.П.Никифоров и другие. Выпускники предыдущих лет С.Л.Мак и Л.Б.Эрлих после защиты диссертаций стали доцентами кафедры.

В 1941 году защитили кандидатские диссертации В.Ф.Мальцев (вариационное управление подачей фрезерного станка при изменении условий обработки) и А.Б.Дашевский (использование дифференциального механизма в приводе сверлильного станка для стабилизации процесса обработки деталей из биметаллов). Эти работы были реальными и выполнялись по заказу Одесских станкозаводов.

В годы Великой Отечественной войны сотрудники кафедры работали на оборонных заводах в Стерлитамаке (доц. Эрлих Л.Б. и доц. Дашевский А.Б.) и Омске (ст. пр. Носов С.К.), М.Ф. Волохович, В.Ф. Мальцев и другие сотрудники находились в действующей армии.

ВОЗРОЖДЕНИЕ

Возрождение кафедры после окончания войны происходило вместе с возрождением политехнического института. Кафедрой последовательно заведовали: доц. А.Б. Дашевский (1945 – 1946 гг.), доц. Л.Б. Эрлих (1947 – 1950гг.), доц. А.П. Волощенко (1950 – 1960 гг.).

В эти годы кафедра интенсивно начала сотрудничать с промышленностью г. Одессы, Южного региона Украины и Молдавии. В 1950 – 1955 гг. защитили кандидатские диссертации по технологической тематике Б.С.Гуськов, А.П.Волощенко (в дальнейшем д.т.н., профессор), Н.Т. Деордиев (в дальнейшем д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники, директор ЭНИИКМАШа), Г.Е. Мигун, Н.В. Олейник (в дальнейшем д.т.н., профессор), С.Н. Филоненко (в дальнейшем профессор, проректор ОПИ) и др.

Интенсивная педагогическая и научная работа на кафедре стимулировалась перебазированием института на Ново-Аркадиевский бульвар (сейчас – проспект Шевченко) и строительством нового помещения кафедры. В 1960 – 1965 гг. были защищены кандидатские диссертации Б.А. Бабичем и В.С. Гусаревым. Диссертация последнего была посвящена структурному анализу и синтезу технологических машин-автоматов.

СОЗИДАНИЕ

Выдающий вклад в развитие кафедры и становление научной школы технологов-машиностроителей внес талантливый организатор научных исследований в области технологии, выдающийся ученый-технолог, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Андрей Александрович Маталин, возглавивший кафедру в 1963 году.

Профессор А.А. Маталин является автором научной гипотезы о технологической наследственности. Для ее подтверждения было организовано проведение исследований и производственных испытаний в лабораториях кафедры и на предприятиях города. Сложные наукоемкие исследования напряженного состояния поверхностных слоев деталей после операций шлифования, хонингования, накатывания, тонкого точения и растачивания потребовали создания лаборатории рентгено-структурного анализа и электронной микроскопии.

На кафедре был организован постоянно действующий семинар по технологии машиностроения, преобразованный впоследствии в Институт повышения квалификации инженеров-технологов юга Украины и Молдавии. В эти же годы начал функционировать специализированный Совет по присуждению ученых степеней кандидатов и докторов наук.

Первые диссертации под руководством профессора А.А. Маталина защитили его ученики И.П. Моисеев и Я.Д. Колкер. В эти годы аспирантами, соискателями и стажерами стали: Е.Н. Некрасов, В.Г. Лебедев, В.Н. Кутяков, К.В. Ломакин, Г.П. Кремнев, О.Н. Руднев, П.А. Линчевский, А.А. Ильященко, В.Г. Католиченко, Р.А. Жабокрицкий, В.А. Дмитришин, В.Н. Морозенко, А.П. Гавриш, граждане Болгарии Д. Маров и Н. Цанев. Все они стали кандидатами наук, а Гавриш А.П., Лебедев В.Г. и Линчевский П.А. – докторами наук.

За неполные десять лет ученики научной школы профессора А.А. Маталина защитили более 20 диссертаций, а некоторые стали основателями новых научных направлений и школ в технологии машиностроения.

В 1974 году А.А. Маталин возвратился в Ленинград на должность заведующего кафедрой, затем и ректора Ленинградского ВТУЗа при металлическом заводе.

РАЗВИТИЕ

Эстафету руководства кафедрой в 1975 году принял Заслуженный деятель науки и техники УССР, Лауреат Государственной премии Украины, доктор технических наук, профессор Якимов Александр Васильевич. Профессором

А.В. Якимовым была создана научная школа по обработке шлифованием на основе тонких математических моделей. Под его руководством разработано принципиально новое направление в шлифовании – прерывистое шлифование. Коллективом его сотрудников созданы десятки конструкций прерывистых кругов и абразивных лент, защищенных авторскими свидетельствами и патентами.

Среди учеников профессора А.В. Якимова – доктора технических наук Ф.В. Новиков, В.П. Ларшин, А.В. Усов (лауреат государственной премии Украины). По тематике А.В. Якимова защищено более 50 кандидатских диссертаций, среди них сотрудники и аспиранты кафедры И.М. Буюкли, Е.Н. Ковальчук, В. Б. Наддачин, Ю.И. Чумный, В.А. Шарков.

Большой цикл работ и оригинальных исследований по шлифованию резьбы передач «винт-гайка качения» выполнены профессором, д.т.н. В.П. Ларшиным, доцентами, к.т.н. Н.Т. Хайловским, Л.П. Соловьевой, В.Ф. Соколовым, Б.О. Ткаченко.

Исследования методов повышения режущей способности шлифовальных кругов проводят Г.П. Кремнев и В.Б. Наддачин. Профессор В.Г. Лебедев изучает системы управления шлифованием. Г.А. Оборский (сейчас профессор, д.т.н., проректор университета) ведет исследования по повышению надежности и стабильности технологических процессов. Исследования по снижению энергетических затрат при осуществлении различных технологических процессов ведет доцент В.С. Гусарев. Им предложен универсальный критерий оценки технологического процесса – удельное энергосодержание технологической операции.

НОВЫЕ РУБЕЖИ

В настоящее время под руководством заведующего кафедрой доктора технических наук, профессора Линчевского Павла Адамовича развивается новое научное направление, актуальное в современной технологической науке – технологическая динамика. В ее основу положен принцип Баушингера – эффект изменения малого объема при пластической деформации и нелинейность связи между напряжениями, возникающими при обработке, и пластическими деформациями в малом объеме поверхности детали. Актуальность и прогрессивность данного направления науки подтверждается успешной защитой докторских диссертаций Оргияном А.А. и Джугуряном Т.Г. и кандидатских – Иоргачевым В.Д. и Онищенко С.М.

Все научные разработки сотрудников кафедры внедряются в учебный процесс. Кафедра ведет подготовку бакалавров, специалистов и магистров по основной специальности «Технология машиностроения» и новой специализации «Компьютерное проектирование технологических процессов».

Ведущими преподавателями кафедры подготовлены и изданы более 20 учебников по технологической тематике. Среди них следует отметить учебник по технологии машиностроения А.А. Маталина, выпущенный в 1985 году, и долгое время использовавшийся техническими ВУЗами СССР, как основной учебник для технологов. Коллективом ведущих преподавателей кафедры под руководством А.В.Якимова подготовлены и изданы учебники по технологии автоматизированного машиностроения, а также несколько учебников по технологии двигателестроения и приборостроения. В России издан в 2002 году авторским коллективом, в составе которого профессора А.В. Якимов и В.П. Ларшин, учебник по технологии машиностроения. В Болгарии В.С. Гусаревым и Н.Ц. Цаневым издан учебник по автоматизации машиностроительного производства. В 2005 году коллективом авторов, в составе которого проф. Линчевский П.А., издан учебник «Технологія машинобудування», который широко используется в учебном процессе.

Результаты научных работ кафедры нашли отражение во множестве статей и десятках монографий, изданных учеными кафедры. Среди них следует отметить десятитомную монографию «Физико-математическая теория процессов обработки», подготовленную коллективом ведущих ученых кафедры «Технология машиностроения» и других кафедр ОНПУ под общей редакцией проф. А.В. Якимова. Результаты работ по прецизионной обработке нашли отражение в монографии «Обработка деталей на отделочно-расточных станках», подготовленной коллективом авторов во главе с проф. П.А. Линчевским.

Кафедра активно сотрудничает с ВУЗами и предприятиями Одессы и Украины. Во время обучения студенты проходят практику на машиностроительных заводах и фирмах г. Одессы: ХК «Микрон», ВАТ «Прессмаш», НПО «Кислородмаш», завод «Стройгидравлика».

После окончания университета выпускники кафедры распределяются на работу на машиностроительные заводы и фирмы г. Одессы и других городов Украины. Обучение с использованием современного промышленного оборудования кафедра ведет на двух филиалах на базе ХК «Микрон» и ВАТ «Прессмаш». На этих филиалах проводится производственная и преддипломная практика.

Научная работа на кафедре осуществляется в направлении «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении» по следующим тематикам:

Технологическая динамика. Тонкое растачивание точных отверстий (руководитель – проф. Линчевский П.А.).

Тепловые явления при алмазно-абразивной обработке деталей машин (руководитель – проф. Якимов А.В.).

Компьютерная диагностика технологических систем и управление процессом шлифования (руководитель – проф. Ларшин В. П.).

Научная школа технологов-машиностроителей Одесского национального политехнического университета внесла существенный вклад в развитие инженерного образования на Украине по технологии машино- и приборостроения, а также по технологии автоматизированного машиностроения.

Поздравляем весь коллектив кафедры с юбилеем и желаем новых научных достижений и успехов в подготовке молодых инженерных кадров!

Доктор технческих наук, профессор Линчевский П.А.,

кандидат технических наук, доцент Гусарев В.С.

POSSIBILITY OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF CARBON-DIOXIDE EMISSION OF POWER PLANTS

The paper investigates the technical and economic (cost) parameters of the release, capture and disposal of CO2 from the flue gases of power plants using fossil fuels (coal, natural gas), making comparisons and generalisations on the basis of the analysis of a wide range of data in the literature.

First, the paper gives reasons why the topic is a hot issue and proves the role of fossil fuels in future energy supply with forecast data. During the technological improvement of power plants in the last 50 years, block capacity has shown a considerable, 5-8 times increase with thermal efficiency increasing by 50-60%, resulting in a 30-40% decrease in specific carbon dioxide release. The paper briefly refers to the theoretical possibility of the sequestration of CO2 in geological formations.

The effects of the implementation of CO2 capture on increasing investment costs and decreasing fuel utilisation (thermal) efficiency are analysed. The efficiency of CO2 capture and the parameters of atmospheric carbon dioxide emission are given for the different fuel types and technological solutions.

In relation to the technological solutions of capture, it is indicated what amount of specific costs (USD/tCO2) is expected for CO2 capture-avoidance and to what extent the costs of electric energy production are increased by capture-avoidance.

1. Introduction: Financing CCS (Carbon Capture and Storage) projects

Like every fundamentally new technological solution, the research and development of energetics systems of large capacity integrating a wide range of technologies and their industrial application require considerable financial resources. The complex technical tasks of large capacity energetics systems (involved in fuel production, processing, combustion, the conversion of heat energy into electrical energy, the treatment and disposal of the combustion products – in this case, those of flue gas CO_2 content), exceedingly high investment costs and long lifecycle raise specific problems. The risks involved in technological solutions and financial (economic) investments also deserve separate consideration. In relation to the financing of research and particularly investment costs, the different countries apply different solutions.

Experts indicate public-private partnership as the precondition for the successful elaboration and actual implementation in industry of CCS or other technologies of similar effect.

The situation in Germany, where RWE Power AG operates two CCS projects bearing the full risks and financial burdens of research and the demonstration plant, is almost unique. [1] One of these projects involves the development of an IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) coal-fired power plant of zero CO₂ emission and 450 MW output while the other is concerned with the implementation of a lignite-fired plant of 1,000 MW output with CO₂ scrubbing.

The condition of development financing is state support, in lack of which economic considerations favour power plants without capture. According to expert opinion, the state should bear the first specific risks of construction and capture. Expectedly, these risks may only be eliminated in the long run. In all probability, it will be unavoidable to compensate first users and initial risk takers.

2. Development of coal-fired power plant technologies towards CO_2 emission reduction (capture and storage)

If one has just a brief overview of the 50 years' past (the period since 1950) and the (currently foreseeable) 15-20 years' future development of coal-fired (coal, brown coal, lignite) power plant technologies, one can say that there is an almost 'paved' way to the minimisation of carbon dioxide emission, and the solution of CO_2 capture from flue gases and its related storage.

In the period between 1950 and 1970, block capacities of 50, 150 and 300 MW operated with thermal efficiency varying between 25-31%. In the period between 1970 and 1990, unit capacity increased to 300-600 MW, which raised thermal efficiency to 31-36% by about 30%. Coal combustion first applied AFBC (Atmospheric Fluidized Bed Combustion) and then PFBC

to 31-36% by about 30%. Coal combustion first applied AFBC (Atmospheric Fluidized Bed Combustion) and then PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion) optimized technology for brown coal fired power plants (German abbreviation: BoA). The *current* (1990-2010) technology makes 1,000 – 1,100 MW block outputs possible, thus enhancing the parameters of the 31-36% thermal efficiency of the previous period by another 30% and yielding 40-45% efficiency. In the general course of development, BoA-Plus technology (involving flue gas scrubbing) achieves 38-41%, while CGCC (Coal Gasification Combined Cycle), IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) and gas- and steam-operated (GuD) power plants yield 38-43% efficiency. In addition to enhancing technical parameters (250-270 atm pressure, 500-700° temperature) and flue gas scrubbing, BoA-Plus technologies provide 41-43% efficiency. In this area, the further increase possibilities of technical parameters (p, T) are limited by material quality problems. The technologies of the *future* (2010-2020) aim at 45-50% efficiency with CO₂ capture although the latter may actually result in an efficiency reduction of 8-12%.

Technologies beyond 2020 represent the *day after tomorrow* with the promise of 55-60% efficiency in the case of certain solutions. (Hybrid-KW 58-63%, SOFC (Solid Oxide Fluid Cell) 50-57%) [9] The other basic development trend, aiming at the mitigation of adverse environmental impacts, is desulphurisation flue gas scrubbing, widely applied in practice. The development trend of our age and the future is the minimisation of carbon dioxide emission. An essential, reasonable solution to specific carbon dioxide release has been and may remain an increase in thermal efficiency (t_{CO2}/MWh , g_{CO2}/kWh) in the future, as well. Any increase in efficiency reduces specific CO₂ release and emission proportionately. With 150 MW blocks, CO₂ release is 1.3 t_{CO2}/MWh while with 600 MW units, this value is 1.15-1.20 t_{CO2} /MWh. With BoA-Plus technology, specific CO₂ is only 0.8-0.9 t_{CO2} /MWh while with BoA-Plus +700°C, IGCC and CGCC technologies, not even 0.7-0.8 t_{CO2}/MWh is impossible. It is a fundamental objective for the technologies of the near (2010-2020) and more remote (2020 and beyond) future to achieve CO₂ capture (minimisation of emission) and the achievement of zero emission (ZEC, ZECA) with the 'final' sequestration and storage of the CO₂ captured [10].

These latter technologies of the future (Oxyfuel, Hybrid-KW, SOFC) take into account a decreasing, 600-700 g/kWh specific CO₂ release even without capture.

3. Variation of power plant investment costs for different fuel types, and technologies with or without CO_2 capture

At the turn of the millennium, fossil fuels accounted for more than 85% of the world's energy demand. On the basis of the investigation of coal and hydrocarbon reserves and the prognostication of the changes in energy demands, several experts are of the opinion that until the middle of the 21^{st} century, the rate of fossil fuels will surely be between 50 and 80% [15, 16, 17, 18, 19].

In the investigation of this topic, it is often crucial to compare the 'use' features of the different fuel types, i. e. coal and hydrocarbons.

With a traditional steam turbine system (PC), specific investment cost is 760 USD/kW with gas combustion and 1,600 USD/kW with coal combustion, the rate being 210%. The surplus specific investment cost of the gas combustion system is 520

USD/kW with a combined steam-gas cycle while that of the coal combustion system with IGCC is 1,700 USD/kW, the latter being 327% of the former. With steam injected gas turbines, the values 410/3,100 give a rate of 317%. The rate of the extra cost of coal use is 258% (400/1,300) with a steam-injected gas turbine with intermediary cooling and 167-188% (600-800/1,000-1,500) with 'state-of-the-art' fuel cell technology [20].

The technical implementation (and, naturally, the energy demand) of CO_2 capture increases power plant investment costs considerably. Different capture technologies and obviously, different cost enhancing factors present themselves for the different fuel types (gas, coal) and the application of different combustion technologies.

According to 2004 data, the specific investment confiduration declification combustion of bituminous coal is 1,410 USD/kW without capture and 1,917 USD/kW with capture, the extra cost amounting to 507 USD/kW or 36%. For the gasification combustion of sub-bituminous coal, specific investment cost is 1,502 USD/kW and 2,190 USD/kW, respectively, with an increment of 688 USD/kW or 46%. With the combustion of lignite of lower heating value, for gasification and amine flue gas scrubbing, the increment is 1,184 USD/kW with a rate of 72% for the respective values of 1,644/2,828 USD/kW. For oxyfuel combustion technology, the increment is 2,330 USD/kW equalling a rate of 142% for the respective values of 1,644/3,974 USD/kW. The latter technology requires more than double investment costs to solve capture due to oxygen use and the 'recycling' of carbon dioxide [21].

In their paper, J. David and H. Herzog [22] developed a complex costing model of CO₂ capture drawing on publications in this topic.

They calculated the 'additional' investment cost for a 1 kg/h CO₂ capture capacity, as well. The specific additional (surplus) cost of CO₂ capture capacity (performance) is lowest for coal powder combustion [~ 300 USD/(kg/h)] while it is ~ 500 USD/(kg/h) for combined cycle coal combustion and 800-900 USD/(kg/h) for gas combustion. The significant, two or three times difference is due to the difference between the CO₂ concentrations and pressure parameters of the flue gas produced and appears in the energy demand of capture, as well.

With gas combustion, flue gas CO₂ concentration is 'only' about 3% and the energy demand of capture is $0.354 \text{ kWh/kg}_{CO2}$, while with coal powder combustion, concentration is about 13% and the specific energy demand of capture is $0.317 \text{ kWh/kg}_{CO2}$. In IGCC power plants, carbon dioxide is in a concentrated flow at a relatively high pressure so the specific energy demand of capture is lowest here with a value of $0.194 \text{ kWh/kg}_{CO2}$ (year 2000 data). Forecast values of specific energy demand for the year 2012 are: $0.297 - 0.196 - 0.135 \text{ kWh/kg}_{CO2}$.

4. Efficiency of electricity production and heat use for different fuel types and technologies

From the aspect of the technological-economic assessment of the different technologies and the variations of flue gas production rate, one of the essential parameters is thermal efficiency. In addition to thermal efficiency, the different sources give specific heat use and also often, relative energy output as basic parameters. As the energy demand of CO₂ capture reduces efficiency parameters (gross-net efficiency), it may serve as one of the qualifying parameters of the technological and economic characterisation of capture.

In the investigation of paper [20], the comparative assessment of the different fuel types gave the efficiency values of 36% for gas combustion in a traditional steam turbine system, and 34% for coal combustion in the same period. With coal combustion, thermal efficiency was 94% compared to that of gas combustion. In the case of a combined steam and gas cycle, 47-42% is the efficiency parameter achieved, with the efficiency of coal combustion being 'only' 89% of that of gas combustion. For a steam-injected gas turbine, the respective values of thermal efficiency are 40% and 36%, the thermal efficiency of coal combustion being 10% lower. For the gas-injected gas turbine technology with intermediary cooling, thermal efficiencies are 47% and 42%, giving the rate of 89%. With a modern heating cell solution, estimated efficiency values are 50-55% and 45-52%, with a rate of 90-95%.

The authors of paper [22], relying on a technological and cost model elaborated during the investigation of the issue, characterise the impact parameters of reference (traditional) and capture technologies on the basis of specific heat consumption. In the paper, the dimension of specific heat consumption is Btu/kWh, where the dimension of Btu equals approximately 1,055 Joule.

Table 1 Specific field consumption for different definition gres (2000 and 2012)							
Technolo	ogy year	Specific heat consumption without capture [Btu/kWh]	Specific heat consumption with CO ₂ capture [Btu/kWh]	Reduction of specific energy output due to capture [%]			
DC	2000	8,277	11,037	25.0			
re	2012	8,042	9,461	15.0			
ICCC	2000	8,081	9,462	14.6			
IUCC	2012	7,137	7,843	9.0			
NCCC	2000	6,201	7,131	13.0			
NOCC	2012	5,677	6,308	10.0			

Data published for the years 2000 and 2012 as per technology (Table 1) Table 1 – Specific heat consumption for different technologies (2000 and 2012)

As it can be seen from the data presented, the reducing effect of CO_2 capture on thermal efficiency may generally be *10-15%*, depending on technology. For some projects under planning, it is *6-12%*, and according to the paper published in 2007, it is 8% with more state-of-the-art coal-lignite fired systems. The combined reducing effect of *capture* + *disposal* (including transportation?) may be *14-28%*, according to paper [12].

5. The amount of carbon dioxide released during combustion, the efficiency of CO_2 capture for different technological solutions

In the use of fossil fuels – especially nowadays, when carbon dioxide release is, in a justified or doubtful way, a hot issue due to technological, economic and environmental considerations – carbon dioxide release/production and atmospheric emission are major considerations and as good as primary assessment parameters. The amount of CO_2 released during fuel combustion basically depends on the type (natural gas or coal) and quality (coal, brown coal, lignite) of fuel and the type, performance, up-to-dateness and thermal efficiency of the combustion system (power plant). Atmospheric emission depends on the flue gas cleaning technology also affected by flue gas CO_2 concentrations and the technological solution and efficiency of CO_2 capture.

With a traditional steam turbine technology, specific CO₂ output is 510/920 g/kWh, with a rate of 180 % (+80 %) while with a combined steam-gas cycle, it is 370/730 g/kWh, with a rate of 197 % (+97 %). With gas injected gas turbines, this value is 440/880 g/kWh, with a rate of 200 % (+100 %) while in the case of steam injected gas turbines with intermediary cooling, the respective values are 370/730 g/kWh, giving a rate of 197 %. For state-of-the-art fuel cell technology, a 330-370/620-700 g/kWh CO₂ release is expected with a forecast rate of 188-189 %.

For the different coal types and the different combustion-capture technologies related to them, data can be found in

publications [21] and [23]. Presumably, the authors of both relied on the same input data (Table 2). Table 2 – Specific CO₂ release for different fuels and technologies

Fuel technology Release emission efficiency		Bituminous coal Gasification	Sub-bituminous coal Gasification	Lignite Gasification	Lignite Amine scrubbing	Lignite Oxyfuel
CO ₂	[21]	771	852	883	883	883
[g/kWh]	[23]	766	851	892	880	885
Capture	[21]	641	750	701	823	738
[g/kWh]	[23]	650	740	710	820	740
Capture	[21]	87	92	85,7	95	90
[%]	[23]	85	87	80	93	84
Emission	[21]	130	102	182	60	145
[g/kWh]	[23]	116	111	182	60	145

From the data presented and taken from various publications, it can be concluded that with the currently operating or planned coal (coal, lignite) combustion technologies, CO_2 release/production is generally 800-900 g/kWh (0.8-0.9 t/MWh) amount of CO₂. With natural gas (gas) combustion, specific CO₂ release is 300-500 g/kWh, exactly half of the amount for coal combustion. (Naturally, it is another issue that with gas combustion, flue gas CO_2 concentration is considerably lower (1/3-1/4) than with coal combustion, which increases the technological and cost parameters of capture/concentration). The efficiency values of CO₂ capture from flue gas are (80) 85-90 (95) %, atmospheric emission is 80-190 g/kWh with coal

combustion, 60 g/kWh with flue gas scrubbing, and 40-50 g/kWh with gas combustion. (with 90 % efficiency)

6. Costs of capture and avoidance

In the assessment of fossil fuel use, on the one hand, the technological parameters investigated for the main components give orientation and, on the other hand, it is worth investigating and comparing economic/cost indicators, as well. The effect of CO_2 capture on investment/establishment costs has already been covered. Now, the effect on operational and total production costs is going to be investigated. The costs of production and CO₂ capture generally include investment costs, as well.

Paper [22], which, using a cost model, takes into account detailed input data (e.g. 1.24 USD/MMBtu fuel costs for PC and IGCC technologies, 2.93 USD/MMBtu for NGCC, which is more than two times higher for gas), as well as capital, operational and maintenance costs in production costs, presents the following parameters. (Table 3)

Technology, period	P	С	IGO	CC	NGCC		
Cost	2000	2012	2000	2012	2000	2012	
Electricity cost without capture [USDc/kWh]	4.39	4.10	4.99	4.10	3.30	3.10	
Electricity cost with capture [USDc/kWh]	7.71	6.26	6.69	5.14	4.91	4.33	
Cost enhancing effect of capture [%]	76	53	34	25	49	40	
Cost of CO ₂ capture [USD/t _{CO2}]	49	32	26	18	49	41	

Table 3: Specific costs of CO₂ capture for different technological solutions

From the assessment of the mostly actual data on CO₂ capture or avoidance highlighted above, which are confirmed by several other sources, it can be calculated that during the application of current power plant technologies or power plant technologies forecast for decades ahead, the specific cost of CO_2 capture is 30-80 USD/t_{CO2} while the cost of avoidance (capture + disposal) is 50-100(120) USD/ t_{CO2} . CO₂ capture from flue gases increases the costs of electricity production by 40-80% (or by 100-120% with oxyfuel technology).

7. Summary, conclusions

According to forecasts concerning the meeting of future energy demands, fossil fuels, i.e. hydrocarbons and coal, will remain dominant in the long run, for another 30-50 years. In view of this fact, it is worth investigating the technological development possibilities of power plants along with expected technological and economic parameters. It is a particularly important current task to specify expectable environmental impacts and particularly, the extent of carbon dioxide production, to forecast technological and economic parameters of capture technologies and define their efficiency, to investigate the chance of minimising CO₂ capture and specify the cost limits involved.

1. It is demanded and expected that R&D on CO₂ release, its capture from flue gases and disposal in (underground, undersea) storage places, the establishment of pilot plants, R&D organisations involved in this topic as well as production plants - with the exception of RWE - will mostly be financed from state/central resources.

2. In the last 50 years, the technological development of power plants using fossil fuels (oil, natural gas, coal, lignite) has been in the direction of modernisation and the enhancing of unit performances. In the last decade, developments have been focussing on the capture of flue gas components (SO₂, CO₂) causing adverse environmental impacts (SO₂, CO₂) and the minimisation of their impact. As a result of power plant technological developments, thermal efficiency has increased from 30-32 % to 42-50(55) %-ra, with the direct consequence of a proportionate decrease in specific carbon dioxide release (g/kWh).

3. The techological implementation of capture from flue gases considerably enhances power plant system investment costs.

According to sources, with the currently operating systems, the extra investment costs due to capture amount to 40-90 %, with the new developments, this value is 30-70 %. According to more recent data, for coal, CO₂ capture increases specific investment

costs from $1.2 \cdot 10^6$ EUR/MW to $1.68 \cdot 10^6$ EUR/MW (~40 %), and for lignite, from $1.35 \cdot 10^6$ EUR/MW to $1.75 \cdot 10^6$ EUR/MW (~30 %).

4. Depending on the fuel type used and the capture technology applied, the application of CO_2 capture generally reduces the thermal efficiency of the system by 10-15%. For some projects currently under planning, a 6-12% reduction in efficiency is taken into account. A more recent paper gives the value of 8% for state-of-the-art coal-lignite combustion.

The joint efficiency reducing effect of capture + disposal (transportation, sequestration) may amount to 14-28 %.

5. A wide range of the publications considered take into account a CO_2 release of 800-900 g/kWh (0,8-0,9 t/MWh) for coal (coal, lignite) combustion and 300-500 g/kWh CO_2 release with gas combustion.

The efficiency of CO₂ capture from flue gases is (80) 85-90 (95) %, while atmospheric emission is 80-180 g/kWh for coal combustion, 60 g/kWh for flue gas scrubbing and 40-50 g/kWh for gas combustion with 90% efficiency.

6. With respect to the specific costs of CO_2 capture/avoidance and its enhancing effect on electricity costs, it is not an easy task to interpret and assess data found in professional literary sources. Data may come from different periods (effect of inflation) and in many cases, 'cost data content' is not unambiguous, either. The enhancing effect of capture (avoidance) on specific electricity costs may considerably depend on fuel types and the capture technologies applied, as well.

According to source [21], capture enhances production costs by 40-90% (120% for oxyfuel technology) while source [23] gives the value of 50-90 (110) % for the cost enhancing effect of capture (avoidance?).

Relying on cost model calculations, paper [22] indicates a 50-80 % increase in production costs for traditional coal powder technologies, 25-35 % for IGCC, and 40-50 % for gas combustion (NGCC) due to CO₂ capture.

The commonly used parameter for the specific costs of CO₂ capture is usually given in USD/t_{CO2}. According to several publications, depending on fuel and technology type, specific capture costs may amount to 30-80 USD/t_{CO2} with the cost of avoidance (capture + disposal) being 50-100(120) USD/t_{CO2}.

With natural gas combustion, CO_2 concentration in flue gases is 'only' 1/3-1/4 of the 8-12 % value for coal combustion, and the cost of CO_2 capture (USD/t_{CO2}) exceeds the costs with coal combustion considerably: capture from flue gases increases the costs of electricity production by 40-80 % (by 100-120 % with an oxyfuel technology).

7. On the basis of both the specific capture costs (USD/ t_{CO2} , USDc/kWh) given in the sources, and Hungarian technological and cost data concerning CO₂ sequestration, approximate values are specified for CO₂ 'avoidance' for the different receptive geological formations. In an average case, 9(10)-14(16) HUF/kWh cost may be estimated for coal (lignite) combustion, practically equalling the cost of the current technologies (without CO₂ capture), which means that avoidance costs would increase present production costs by a round 80-100 %, in itself a higher value than the full cost of nuclear power plant electricity production.

References: 1. Dr. Hans-Wilhelm Schiffer, RWE Power AG, The Financial Aspect of Implementing an IGCC Project in Germany. London, 31 May, 2007. 2. Heleen Groenenberg (ECN, Environmental Change Network, Netherlands), Expert Workshop on Financing Carbon Capture and Storage: Barriers and Solutions. July 2007. p. 9. 3. Michel Myhre-Nielsen (Statoil New Energy), A Norwegian Perspective on Ongoing CCS Projects. London, 31 May, 2007. 4. Brian Count (Progressive Energy in the United Kingdom), Expert Worksop on Financing Carbon Capture and Storage: Barriers and Solution. July 2007. p. 20. 5. Dr. Peter Cook (CO2 Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies), Demonstrating CCS in Australia - The Otway Project, London, 31 May, 2007. 6. Malcolm Wilson (Centre for Studies in Energy and Environment at the University of Regina in Canada), Results of Recent Innovation Forum on the Clean Carbon Economy Concerning CCS. Expert Workshop on Financing Carbon Capture and Storage: Barriers and Solution. July 2007. p. 11. 7. Preston Chiaro (World Coal Institute and Rio Tinto), Carbon Capture and Storage Projects and Financing. London, 31 May, 2007. 8. Mark Trexler (Ecosecurities Global Consulting Services), Expert Workshop on Financing Carbon Capture and Storage: Barriers and Solution. July 2007. p. 14. 9. Continuous modernisation and increased efficiency pave the way to CCS. Source DEBRIV. 10. Effezienzsteigerung und CO2 Abtrennung. RWE. 11. International Energy Agency (IEA): CO2 Abtrennung und Speicherung in Deutschland, IEA Greenhouse Gas Programme. 12. R. Duckat, M. Treber, C. Bals, G. Kier, CO₂ – Abscheidung und Lagerung als Beitrag zum Klimaschutz? Ergebnisse des "JPCC Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage" von November 2002 und Bewertung durch Germanwatch. 13. World Coal Institute (IEA Greenhouse Gas R+D Programme, July 2007): Storing CO2 Underground. 14. Parson - Keith (Science 282/1988. pp. 1053-1054.) 15. Vajda, György, Energiapolitika. Magyarország az ezredfordulón. Štratégiai kutatások a Magyar Tudományos Akadémián. Budapest, 2001. Hungarian Academy of Sciences. 16. Vajda, Gy., "Energiaellátás ma és holnap. Magyarország az ezredfordulón", Stratégiai kutatások a Magyar Tudományos Akadémián, Hungarian Academy of Sciences, Budapest (2004). 17. Büki, G., "A jövő és az energia", Mémök Újság, XIII(11), 12 (2006). 18. Pápay, J., Kőolaj- és földgáztermelés a XXI. században, Bányászati és Kohászati Lapok Kőolaj és Földgáz, Vol. 139(206). No. 3., pp. 1-12. **19.** Kumar, S., "Global Coal Vision – 2030", Mining in the 21st Century – Quo Vadis? Proceedings pp. 137-148, 19th World Mining Congress, New Delhi (2003). **20.** Fulkerson W. –Judkins R.R. –Sanghvi M.K., Fosszilis energiahordozók. Tudomány (Hungarian version of Scientific American). November 1990. pp. 83-89. 21. Morrison G. F., Summary of Canadian Clean Power Coalition Work on CO2 Capture and Storage. (IEA Clean Coal Centre) August 2004. 22. David J., Herzog H., The cost of carbon capture. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA, http://sequestration.mit.edu/pdf.David and Harzog.pdf. 23. Canadian Clean Power Coalition: CCPC Phase Executive Summary (Summary Report on the Phase I Feasibility Studies Conducted by the Canadian Clean Power Coalition) May 2004. 24. Thambimuthu K. (CAN MET Energy Technology Centre Natural Resources Canada), CO2 Capture and Reuse. (www.iegreen.org.uk).

List of abbreviations

Abbreviation	Full English version
BoA or BOA	Best Optimized Plant
GuD	Gas and Dampf Process
MEA	Mono-ethanol amine
CCS	Carbon(dioxide) Capture and Storage
CLC	Chemical Looping Combustion
NGCC	Natural Gas fired Combustion turbine/combined-cycle
IGCC	Integrated Coal Gasification Combined Cycles
PC	Pulverized Coal-fired simple cycles
CGCC	Coal Gasification Combined Cycle
AFBC	Atmospheric Fluidized-Bed Combustion
PFBC	Pressurized Fluidized-Bed Combustion
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
ZEC	Zero Emission Coal
ZECA	Zero Emission Coal Alliance

Д. В. Криворучко, канд. техн. наук, В. А. Залога, д-р техн. наук, А. Н. Сорокин, Сумы, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕШАТЕЛЯ

Some investigations on productivity and accuracy of explicit finite element simulations of no steady-state machining operations are represented in this article. Element formulation, hourglass method, contact algorithm, explicit integration time step and their parameters are discussed. The recommendations for increasing of analysis productivity are proposed.

На современном этапе развития науки о резании материалов 3D моделирование методом конечных элементов является важным инструментом исследования процессов резания. Программный модуль, называемый решателем, который выполняет интегрирование уравнений движения и теплопроводности, решение контактных задач и другие действия по расчету модели, основан на алгоритмах, которые имеют ряд параметров, обеспечивающих адаптацию этих алгоритмов под конкретные условия решаемой задачи. Параметры решателя влияют на производительность вычислений и ошибку прогнозирования показателей процессы резания. Наиболее сложными с точки зрения выбора параметров решателя являются нестационарные процессы резания (зубообработка, фрезерование, тангенциальное точение и т.п.), а также переходные этапы квазистационарных процессов – врезания и выхода инструмента. Поэтому *целью настоящей работы* является разработка рекомендаций по выбору параметров решателей, работающих методом явного интегрирования уравнений движения, которые при прочих равных условиях обеспечивают 3D моделирование нестационарных процессов – врезания обеспечивают 3D моделирование силы резания и теплопроводительность и тегрирования уравнений движения, которые при прочих равных условиях обеспечивают 3D моделирование нестационарных процессов и приемлемой ошибкой прогнозирования силы резания и формы стружки.

Рассмотрим переходной процесс врезания с переменной толщиной среза, который свойственен большинству рабочих процессов резания. Расчетная схема представлена в таблице 1. Для определенности угол результирующего движения резания выбран 0,18°, что соответствует углу результирующего движения резания, например, у вершины сверла диаметром 10 мм, работающего с подачей 0.10 мм/об. Исследования проводились в диапазоне скоростей резания от 50 до 5000 м/мин.

		Прямоугольное свободное резание							РАСЧЕТНАЯ СХЕМА										
Размерность модели 3D																			
	Геометрические параметры заготовки														7.	Y	CA.	-	
		В ₃ , мм Н ₃ ,ми					3,MM								*				
	12,3			0,16 0,15															
	Геометрические параметры инструмента																		
Ha	Название инструмента Лезвие																		
Lи, мі	1, MM	Bи(d)	,мм g, ° а, °		r,	r, мм		мм		η									
1,25		1,5	1,!	5	10	10	0,	00	0)	X,Y,Z								
	Конечно-элементная сетка											-		-	1			20	
	Ти			Vor	DO	Van		Ф пог	ik		*								
	K	п і Э		ЭП-	TOB	лар.	n na	флаі авном	л (η h									
			17507	45.		05	νη ης			1				ИЖ,ИИ,ИГ,ИП, ЗИ,ЗН,ЗБ, ЗТ,					
И	Soli	Id'I	1/58/	154	14	35 MK	м ра	BHON	И.	-	дог	тущения	ВК, ВО, ТЖ, ОВ, ПР,ПМ,ПУ,ПЕ,ПЗД					ПЕ,ПЗД	
3	3 Solid1 16650 22260 16мкм равном. 5/0,01																		
									Мод	іели	материа	алов							
					Инсп	прумен	нm					Заготовка							
M	Марка основ. материала ВК8							Марка материала Сталь 45											
Номе в БД	ep I ⊦	HRA	Е, ГПа	m	а _и .^ 1/°	10 ⁶ , °C	г ₂₀ , кг/м ³	С Дж/(і	С _м , (кг∙ ° С)	I, Bı	г/(м· ° С)	Номер в БД	HB	Е, ГПа	m	г ₂₀ , кг/м ³	Дж/	С _м , (кт∙°С)	I, Вт/(м·°С)
BK8	3 8	37.5	620	0.3	3,	5 1	4400	15	53,0		54,4	Ст. 45-1	196	205	0,29	7826	6	42,0	40,2
Хар-	Хар-ка РМ Абсолютно-жесткое тело									Хар-ка Р	РМ	(553.1+600.8*ep^0.234)* (1+0.0134*ln(epr))*(1-Tm^1.0)			!)* ^1.0)				
Ha	Наим. покрытия				виртуальное Тол				а, мкм	мкм 10		Парам. геометрич.			MP	Парам. Физич. МР			ч. МР
Ме мод-	тод -ния	HV	Е, ГПа	m	r2 кг/г	0, м ³ Д	С _м , ж/(кг·°	C) E	I, Вт/(м·°)	C)	R _q , °С/Вт	Алгорит	гм	Крите	рий	Алгор	оитм	К	ритерий

Таблица 1 – Сводная таблица исходных данных модели прямоугольного свободного резания с непрерывно увеличивающейся толщиной среза

-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	уд. элем.	e _p =2,5

В данной работе модель процесса резания реализована в программе LS-DYNA, которая является характерным представителем явных решателей. Несмотря на то, что названия параметров в других решателях могут отличаться от тех, что приняты в LS-DYNA, полученные результаты и разработанные рекомендации для решателя LS-DYNA методологически могут быть использованы и для других решателей. Анализ литературы [] и предварительные расчеты показали, что при заданной конечно-элементной сетке заготовки и инструмента наиболее существенно влияют следующие 7 факторов: алгоритм подавления безэнергетических форм деформации *ihq* и его параметр q_m, тип элемента *elform*, контактный алгоритм soft и величина контактной жесткости sclfac, толщина виртуального покрытия C (sldthk), коэффициент увеличения шага интегрирования (ускорения вычислений) $k_{Dt} = \text{Dt}/\text{Dt}_0$.

Для решения динамических задач наибольшее применение нашли

8-ми узловые конечные элементы-бруски. Известны две реализации этих элементов. Элементы типа 1 имеют 1 квадратурную точку в центре масс, требуют мало вычислительных ресурсов и обладают повышенной устойчивостью к искажению своей формы. Однако элементы типа 1 самопроизвольно искажаются в направлениях, перпендикулярных содетство в портании и портании простоина в направлениях перпендикулярных искажению своей формы. Однако элементы типа 1 самопроизвольно искажаются в направлениях, перпендикулярных действию внешних сил при моделировании больших пластических деформаций вследствие возникновения безэнергетических форм деформации. Для их подавления используют различные алгоритмы. Анализ результатов проведенных исследований влияния алгоритма подавления безэнергетических форм деформаций показал, что алгоритм Фланаган-Белычко с точным интегрированием по объему в формулировке увеличения жесткости дает значительно более стабильное решение, чем тот же алгоритм в вязкостной формулировке даже при скорости резания 5000 м/мин. Поэтому для практически всех моделей резания следует рекомендовать алгоритм подавления безэнергетических форм деформаций в формулировке увеличения жесткости (ihq=5).



Рис. 1 – Область допустимых значений параметра qm

Рис. 2 – Влияние параметра qm на время счета t

Существенное влияние оказывает параметр алгоритма qm. С его увеличением возрастает относительная энергия

безэнергетических форм деформации. Согласно рекомендациям [] ене должно превышать 10%.



Рис. 3 – Влияние параметра qm на прогноз силы резания и форму стружки

Установлено, предельное значение q_m, обеспечивающее это условие, изменяется с изменением скорости резания. Для удобства его определения построена диаграмма (рис. 1). С увеличением q_m увеличивается жесткость КЭ, поэтому увеличивается сила резания и уменьшается время счета. Увеличение qm до 10% увеличивает силу резания примерно на 20%, но и на столько же уменьшает время счета для всех скоростей резания. При решении задач, где ошибка в значении силы резания не имеет решающего значения, но важным является время счета (например, при исследовании влияния геометрии лезвия на форму стружки) можно существенно уменьшить время счета за счет увеличения q_m (рис. 2). Вместе с тем надо учитывать, что q_m влияет и на форму стружки, особенно при врезании, когда размер элемента соизмерим с толщиной среза (рис. . 3).

Элементы типа 2 имеют 8 квадратурных точек, и, следовательно, значительно более ресурсоемкие, чем элементы типа 1. Пробные расчеты показывают, что время вычислений при применении этих элементов почти в 2 раза больше, чем при применении элементов типа 1. Вместе с тем элементам типа 2 не свойственно появление безэнергетических форм деформаций. Следует также отметить, что при использовании элемента типа 2, вследствие его повышенной жесткости при врезании устойчивое стружкообразование начинается позже (в два раза и более), что вносит существенную ошибку при моделировании переходных процессов.

Для моделирования контактного взаимодействия в LS-DYNA реализованы две модификации алгоритма штрафов []. Пробные вычисления показали, что стандартный алгоритм штрафов (*soft=0* и *soft=1*) дает лучшие результаты при малых скоростях резания, в то время как сегментная модификация алгоритма штрафов (*soft=2*) оказывается применимой только при скоростях 500 м/мин и более из-за значительного времени расчета с помощью этого алгоритма.

Следует обратить внимание на выполнение граничных условий в области режуще кромки при использовании различных контактных алгоритмов. Как видно из рис. 4 при использовании алгоритма soft=1 узел на вершине лезвия проникает в элемент заготовки перед ней, в то время как ни один из узлов заготовки не проникает в лезвие. Тем самым в элементах, которые моделируют трещину создаются напряжения растяжения, что существенно отличается от реальных условий перед режущей кромкой. Это отличие будет тем большим, чем больше размер конечных элементов, моделирующих разрушение.

В то же время при использовании алгоритма soft=2 проникновения узлов лезвия в заготовку не наблюдается, чем реализуются достоверные граничные условия в области режущей кромки. Однако учитывая значительные затраты вычислительных ресурсов, необходимых для реализации алгоритма soft=2, на практике следует его использовать лишь тогда, когда действительно необходимо обеспечить достоверные граничные условия в области режущей кромки.



Рис. 4 – Влияние контактного алгоритма и коэффициента жесткости контакта на форму стружки при скорости резания 500 м/мин

Важным параметром любой модификации алгоритма штрафов является величина коэффициента контактной жесткости *slsfac*. На его величину влияют модули упругости контактируемых тел K и размер конечных элементов. Опыты показали, что при одинаковых размерах КЭ на контактных поверхностях для твердосплавного инструмента наивыгоднейшее значение *slsfac* равно 0.5.

Рассмотрим влияние размеров конечных элементов, образующих контактные поверхности на наивыгоднейшее значение коэффициента контактной жесткости *slsfac*. Пусть инструмент и заготовка описаны конечными элементами в виде прямоугольных параллелепипедов объемом V со сторонами длиной a, b, c, причем стороны a и b образуют контактный сегмент площадью A, а сторона c перпендикулярна ему. Тогда контактная жесткость может быть вычислена по формуле []:

$$k_{I} = \frac{slsfac \cdot K \cdot A}{V} = \frac{slsfac \cdot K \cdot a^{1} \cdot b^{1}}{a \cdot b \cdot c} = \frac{slsfac \cdot K \cdot (a \cdot b)}{c}.$$
(1)

Пусть существует некоторое наивыгоднейшее значение контактной жесткости ^{*к*} , которое не зависит от размеров и формы элементов, а определяется лишь свойствами материалов системы. Тогда выбором величины коэффициента *slsfac* следует обеспечить величину *к* при решении задачи с конкретной КЭ сеткой. Если переписать выражение (1) в виде

$$slsfac = \frac{k_{I}}{K} \frac{c}{(a \cdot b)} , \text{ r.e. } slsfac \square \frac{c}{(a \cdot b)} , \tag{2}$$

то становится очевидным, что коэффициент *slsfac* прямо пропорционален размеру с элемента (его «глубине») и обратно пропорционален площади контактного сегмента (произведению длин сторон $a \cdot b$) и модулю упругости *К*. Поэтому если размеры КЭ при решении конкретной задачи будут существенно (более чем в 4 раза) отличаться от тех, что применялись в данном исследовании (16 мкм для заготовки и 35 мкм для лезвия), то величина коэффициента контактной жесткости *slsfac* должна быть скорректирована в соответствии с формулой (2). Например, если размер КЭ лезвия составляет около 1 мм, то коэффициент *slsfac* необходимо уменьшить до величины

$$0.5 \frac{0.035 \cdot 0.035}{1.0 \cdot 1.0} \frac{1.0}{0.035} = 0.017$$

Как показали исследования повысить численную устойчивость контактного алгоритма при моделировании врезания абсолютно острым лезвием можно введением виртуального покрытия толщиной d, обеспечивающего достоверное определение направления нормали к контактной поверхности в области режущей кромки, имеющей острый угол заострения. Оптимальное значение параметра d составляет около 0,01 мм во всем исследованном диапазоне скоростей резания.



Рис. 5 – Область допустимых значений коэффициента увеличения шага интегрирования $k_{Dt}=Dt/Dt_0$

Алгоритм явного интегрирования уравнений движения имеет ограничение шага интегрирования Dt₀, которое выражается условием Куранта- Фредрикса-Леви (CFL-условие):

(3)

$$\Delta \tau_{g} < \Delta \tau_{max} = L/c , c = f(\rho, E).$$

де L - характерный размер КЭ; c - скорость звука в деформируемом теле; r - плотность, E - модуль упругости.

За счет увеличения шага интегрирования Dt_0 можно существенно увеличить производительность вычислений. Не нарушая CFL-условие это можно сделать путем масштабирования массы (плотности) заготовки. Это особенно важно для моделирования резания со средними и малыми скоростями резания (до 500 м/мин). Исследования показывают, что с увеличением шага интегрирования k_{Dt} =Dt/Dt₀ время счета нелинейно убывает (рис.. 5,б). Однако добавление массы вносит в систему дополнительные нереальные динамические силы, которые при некоторых значениях k_{Dt} проявляются, внося значительную ошибку в результаты расчета. Предложено оценить допустимое значение k_{Dt} по условию не превышения относительной энергией безэнергетических форм деформации величины 10%. Предельная кривая k_{Dt} от скорости резания V представлена на рис. 5. Видно, что чем меньше скорость резания в моделируемом процессе, тем можно использовать больший коэффициент увеличения шага интегрирования. Это положение позволяет ожидать, что минимальное время счета моделей 3D рабочих процессов резания с одинаковым количеством элементов со скоростями резания в диапазоне от 50 до 500 м/мин будет практически одинаковым (пунктирная кривая на рис. 5,6) и резко убывать при реализации моделей со скоростями резания более 500 м/мин.

Выводы.

Проведенные исследования показали, что наивыгоднейшие значения параметров решателя LS-DYNA обеспечивают минимальное время вычислений и наименьшую ошибку прогнозирования силы резания, формы стружки, времени начала устойчивого стружкообразования и других показателей процесса резания. В диапазоне скоростей резания от 50 до 5000 м/мин для сталей эти параметры могут быть выбраны следующими:

• алгоритм подавления безэнергетических форм деформации - алгоритм Фланаган-Белычко с точным интегрированием по объему для объемных элементов в формулировке увеличения жесткости *ihq* =5;

- параметр q_m по рисунку 1 для заданной скорости резания;
- элемент типа 1 *elform* =1;
- контактный алгоритм *soft=1*, во всех случаях, где можно допустить неточность граничных условий в области режущей кромки, и *soft=2* во всех остальных случаях;
- величина коэффициента контактной жесткости *sclfac* = 0.5 с учетом коррекции на размер КЭ по формуле (2),
- толщина виртуального покрытия d=0.01,
- коэффициент увеличения шага интегрирования (ускорения вычислений) *k*_D*t* по рисунку . 5, а для заданной скорости резания.

Список литературы: 1. *Hallquist J. O.* LS-DYNA Theoretical manual. -Livermore: LSTC, 1998.-498 с. 2. *Муйземнек А. Ю*. Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа. -Пенза: ИЦ ПГУ, 2005. - 152 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2009

В. С. Кушнер, д-р техн. наук, Омск, Россия,М. Г. Сторчак, д-р техн. наук, Штуттгарт, Германия,В. А. Горелов, д-р техн. наук, Омск, Россия

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕЗАНИИ

The changes of the mechanical properties of the materials during cutting were investigated. It was shown that it is reasonable to use the maximal yield strength of a material to characterise the mechanical properties. It is reached by equal strengthening and softening during deformation under adiabatic behaviour.

1. Введение

Определение действительных механических свойств деформируемого материала, выбор моделей сопротивления материалов пластической деформации, введение дополнительных гипотез и предположений о свойствах и физической природе деформируемой среды относятся к основным проблемам физики, связанным со схематизацией задач механики сплошной среды. Это в полной мере относится и к резанию металлов.

Известны попытки распространить определяемые в статических испытаниях на растяжение или сжатие характеристики механических свойств материалов и на условия резания металлов [1, 2]. В качестве характеристик сопротивления материалов при резании предлагалось использовать и непосредственно средние удельные касательные

силы (средние касательные напряжения) в зоне стружкообразования 🕻 и на передней поверхности режущего лезвия

ч [3, 4]. При этом считалось, что касательные напряжений *ч* и *ч* зависят только от прочностных характеристик при растяжении и не зависят от прочих условий резания. Альтернативное мнение состояло в том, что касательные

напряжения r_{r} и q_{r} не постоянны и не могут считаться характеристиками механических свойств материалов при резании [5, 6].

Актуальность решения проблемы определения действительных механических свойств материалов для условий резания возросла в связи с необходимостью разработки теоретических методов расчета температур, сил резания с целью использованиях результатов расчета для обоснования рациональных режимов резания, геометрических параметров инструментов, автоматизации проектирования и оптимизации технологических процессов обработки резанием.

2. Анализ основных гипотех о сопротивлении обрабатываемых материалов резанию, не учитывавших влияние температуры

Методы определения средних касательных напряжений при резании разрабатывались чаще всего в связи теоретическим расчетом сил резания

[1, 2]. А. М. Розенберг для расчета напряжений ^с в условной плоскости сдвига использовал гипотезу о равенстве удельных работ деформации при резании и при сжатии [2]:

$$\mathbf{r}_{\mathbf{y}} = \frac{\sigma_{\mathbf{g}}}{n \varepsilon_{\mathbf{u}}} \left[\exp\left(\frac{n \varepsilon_{\mathbf{u}}}{1, 5}\right) - 1 \right],\tag{1}$$

Н. Н. Зорев [1] сопоставлял предел текучести на сдвиг при растяжении и средние касательные напряжения ^ку в условной плоскости сдвига при резании, используя закон простого нагружения:

$$\sigma_{\rho} = A \mathcal{E}_{\mu}^{m}, \qquad (2)$$

где 🔽 - предел текучести на сдвиг при растяжении, 🗳 - истинный сдвиг.

Однако в опытах Н.Н.Зорева [1] по резанию различных сталей вопреки уравнению (2) средние касательные

напряжения **5** в условной плоскости сдвига с увеличением конечного истинного сдвига в зоне стружкообразования не возрастали, а либо оставались постоянными, либо уменьшались при увеличении истинного сдвига (рис. 1).



Рис. 1 – Влияние деформации ε_{\bullet} на касательные напряжения τ_{F} при точении стали 10 (a) ($\sigma_{\bullet} = 564M\Pi a, m = 0, 28$ [2], $\sigma_{\bullet} = 380 M\Pi a, \delta = 34\%$ [1]) и стали 30 (6) ($\sigma_{\bullet} = 770M\Pi a, m = 0, 2$ [2], $\sigma_{\bullet} = 570 M\Pi a, \delta = 25\%$ [1])

На этом основании в работе [1] было принято допущение о независимости касательных напряжений r_{p} при резании от деформации r_{u} . Сопоставляя зависимость $r_{p}(r_{u})$, полученную при растяжении, с результатами опытов по резанию, Н. Н. Зорев [1] пришел к выводу о возможности оценки величины $r_{p}(r_{u})$ путем экстраполяции зависимости $r_{p}(r_{u})$ на величину истинного сдвига $r_{u} = 2,5$:

$$r_{p} = A_{1,1} = A(2,5)^{m}$$
 (3)

Несмотря на сходство гипотез, использовавшихся в работах [1, 2] для расчета напряжений ^с*у*, полученные экспериментальные и теоретические результаты определения касательных напряжений ^с*у* в условной плоскости сдвига для одинаковых условий резания существенно различались (рис. 1).

Большое распространение получили эмпирические соотношения, связывающие напряжения ^т только с прочностными характеристиками материала при растяжении [1,5]:

В работе [3] постоянство касательных напряжений в зоне стружкообразования обосновывалось тем обстоятельством, что при резании конструкционных сталей относительно небольшой твердости температуры в зоне стружкообразования также были невысокими (около 300 °C) и не могли существенно повлиять на предел текучести деформируемого материала. Однако наряду со стационарными зависимостями напряжения r_{y} от деформации e_{w} наблюдались и убывающие зависимости. Гипотеза о постоянстве касательных напряжений r_{y} в зоне стружкообразовании при резании, использовавшаяся многими исследователями [3], опровергается убывающими зависимостями $r_{y}(e_{w})$, которые были получены для мало упрочняемых сталей.

В работе [4] гипотеза о постоянстве касательных напряжений в зоне стружкообразования распространена и на участок пластического контакта на передней поверхности. Считалось, что кратковременный нагрев материала в процессе резания до высокой температуры (например, до 1000 - 1200 °С для сталей) не изменяет механических свойств обрабатываемого материала. Они остаются такими же, как и при комнатной температуре. На этом основании

средние касательные напряжения ${}^{Q}_{F}$ на передней поверхности принимались пропорциональными действительному пределу прочности при растяжении ${}^{S}_{b}[3, 4, 5]$:

$$q_{F} = 0,6 \ S_{b}, \ q_{F} = 0,28 \ S_{b},$$

а отношение $q_{\mathbf{F}}/r_{\mathbf{F}}$ принималось постоянным для любых условий резания:

$$q_{\mathbf{F}} \approx r_{\mathbf{y}}, q_{\mathbf{F}} \approx 0.5 r_{\mathbf{y}}$$

3. О влиянии температуры на касательные напряжения при резании

Согласно существующим представлениям температура деформации оказывает сложное влияние на предел текучести. При повышении температуры предел текучести деформируемого материала уменьшается, причем зависимости предела текучести (или предела прочности) от температуры могут быть различными для различных сплавов. Увеличение скорости деформации приводит к росту предела текучести, причем с повышением температуры влияние скорости деформации проявляется в большей степени. Определяющее уравнение, отражающее влияние деформации, скорости деформации и температуры, имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)^{k\Delta T'} f\left(\Delta T'\right)$$

(8)

Уравнение (6), полученное на основании теоретических исследований и на основании обобщения экспериментальных данных, указывает на весьма сложную связь между пределом текучести, деформацией, скоростью деформации и температурой.

Известны предположения о том, что влияния скорости деформации и температуры компенсируют друг друга. С этой целью применялся параметр Зенера-Холомона или температура, модифицированная скоростью деформации [5]:

$$T_{\mu} = T \left(1 - K \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{g}} \right) \tag{9}$$

Однако имеющиеся экспериментальные данные, в частности, опыты Финни и Уолэка [5] (рис. 2) опровергают эту гипотезу.

(7)

(6)


Рис. 2 – Влияние истинного сдвига на предел текучести на сдвиг при сжатии (кривая 1, скорость деформации ≈ 10⁻² c⁻¹) и на касательное напряжение в условной плоскости сдвига при резании технически чистого алюминия (кривая 2, скорость деформации ≈ 10³ −10⁴ c⁻¹)

Убывающие зависимости касательного напряжения *у* от истинного сдвига *и*, наблюдавшиеся в опытах Н. Н. Зорева [1], С. Спаанса, В. С. Кушнера [5] и др., являются доказательством влияния температуры, которая при адиабатических условиях деформации пропорциональна истинному сдвигу. Влияние температуры на предел текучести в различных областях зоны деформации имеет особенности, связанные со схематизацией зоны деформации. *4. Схематизация зоны деформации и ее влияние на предел текучести деформируемого материала*

Зону пластических деформаций при резании принято разделять на зону стружкообразования (области A и A¢) и на зону контактных пластических деформаций (области Б, В и Г) (рис.3). Целесообразность условного деления зоны

стружкообразования на две области: широкую область относительно небольших деформаций A¢ и узкую область больших деформаций A, отмечалась в работе [3]. Здесь же на основании анализа корней стружки сделан вывод о прямолинейности конечной границы зоны стружкообразования.

Многие исследователи (Т.Н.Лоладзе, П.Б.Оксли, В.И.Садчиков, С.Спаанс, И.Л.Тэи Р.Ф.Скраттон и др.[5]), пренебрегая областью малых деформаций А¢, ограничивали зону стружкообразования параллельными границами.



Рис.3 – Схема зоны деформации в плоскости стружкообразования при образовании сливной стружки: А – область больших деформаций зоны стружкообразования, Б – застойная зона на передней поверхности (область деформаций, не превышающих конечных деформаций зоны стружкообразования), Г - застойная зона на задней поверхности, В – участок больших пластических контактных деформаций на передней поверхности, Е - участок больших пластического контакта на задней поверхности, F, ^Pr – касательные силы на передней поверхности и в условной плоскости сдвига, j_v – угол наклона условной плоскости сдвига, а – толщина срезаемого

слоя.

Наличие пластического участка контакта стружки с режущим лезвием отмечалось в работах [3, 4 и др.]. В работе [1] было выявлено существование застойной зоны на передней поверхности в области, прилегающей к режущей кромке. Часть этой застойной зоны, расположенная вблизи линии срезаемого слоя непосредственно перед фаской износа задней поверхности, рассматривается как застойная зона Г.

В работе [5] показано, что в узкой зоне стружкообразования изменение предела текучести не может быть существенным. В такой зоне деформируемый материал имеет свойства идеально пластического тела. Очевидно, справедливо и обратное: локализация деформации в узкой области осуществляется при выравнивании интенсивностей упрочнения и разупрочнения материала. Таким образом, рассмотрение широкой области АС первоначальных деформаций важно для оценки упрочнения деформируемого материала, в то время как конечный истинный сдвиг через удельную работу и температуру деформации влияет на уровень стабилизации предела текучести в узкой зоне стружкообразования А, рис. 4.



Рис. 4 – Зависимости предела текучести от текущего истинного сдвига в зоне стружкообразования (кривые 1, 2, 3) и на передней поверхности (кривая 4)

Описанная схема объясняет убывающие зависимости $\tau_{r}(\varepsilon_{u})$, полученные различными исследователями для ряда обрабатываемых материалов.

В отличие от зоны стружкообразования более высокие температуры на участке В на передней поверхности не могут оказывать влияние на предел текучести в застойной области Б. Поэтому зависимость предела текучести от истинного сдвига должна иметь вид кривой с максимумом (см. рис. 4).

Максимумы предела текучести, достигаемые в зоне стружкообразования или на участке застойной зоны на передней поверхности целесообразно использовать в качестве характеристик механических свойств материала при резании.

Имеются достаточные основания считать, что эти максимальные значения предела текучести должны быть

несколько различными. Это связано с тем, что при одинаковых сдвиговых деформациях и неоднородность распределения деформаций в зоне стружкообразования больше, чем в застойной зоне В. Вследствие этого средняя температура деформации в зоне стружкообразования будет меньше, чем в застойной зоне. При этом согласно уравнению (6) коэффициент динамичности для зоны В должен быть выше, чем для зоны А¢. Следовательно,

максимальное значение предела текучести ^q в зоне В должно быть больше, чем максимальный предел текучести ^т в зоне стружкообразования.

Более высокие значения предела текучести на передней поверхности в области Б, чем в зоне стружкообразования, согласуются с явлением образования нароста на передней поверхности. Частицы, образующие нарост на передней поверхности, должны быть тверже материала стружки, получившего деформацию в зоне стружкообразования.

Еще одна особенность упрочнения материала при резании заключается в том, что максимальное значение предела текучести в застойных областях Б и Γ в действительности имеет место, хотя и на очень малом участке, в то время как в зоне стружкообразования наибольшее значение предела текучести может быть меньше теоретически рассчитанного $\tilde{\tau}$ (рис.4).

Влияние температуры на предел текучести на участке В должно сказываться на величине среднего касательного напряжения **ч**, в то время как максимальный предел текучести **ч** не зависит от температуры.

5. Экспериментальные доказательства изменения касательных напряжений *Я^{<i>p*} *и* отношения *Я^{<i>p*}/*^r*

Известные опыты А. М. Розенберга и Л. А. Хворостухина [2], о соотношении между отношением касательных сил

 F/P_{r} и усадкой стружки Z с использованием формулы Н.Г.Абуладзе для определения длины контакта стружки с резцом могут быть представлены и в виде зависимости усадки стружки от отношения средних касательных напряжений q_{r}/r_{r} (рис. 5):

$$\frac{q_F}{\tau_F} = \frac{F/P_r}{(c/a)\sin\varphi_F},$$

rge $\frac{c}{a} = \zeta^{0,1} \left[\zeta \left(1 - tg\gamma \right) + \frac{1}{\cos\gamma} \right], \quad \varphi_F = arctg \frac{\cos\gamma}{\zeta - \sin\gamma}$

(10)



Рис. 5 – Зависимости усадки стружки Z от отношения F/P_r касательных сил и от отношения q_r/r_r по экспериментальным данным A.M.Poзенберга при точении сталей резцом T15K6 (g=0, t=3 мм, S=0,291 мм/об)

Из рис. 5 (б) следует, что отношение $q_{\mathbf{F}}/r_{\mathbf{F}}$ не остается постоянным.



Рис. 6 – Зависимости усадки стружки от удельной силы трения F (рис. 7, а) и от среднего касательного напряжения при точении стали 35 по данным М.И.Клушина и М.Б.Гордона [2]

Изменение среднего касательного напряжения экспериментальных данных М.И.Клушина и М. Б. Гордона [2], полученных при точении стали 35 (рис. 6).

Такой же вывод следует из обработки экспериментальных данных Н. Н. Зорева о силах резания и усадке стружки при точении стали 35ХЗМН (рис. 7).



Таким образом, уменьшение отношения $q_{\bf F}/r_{\bf F}$ вызывает уменьшение усадки стружки. В то же время известно [1, 2, 3], что уменьшение усадки стружки наблюдается при увеличении температуры передней поверхности.



Рис. 7 – Зависимость усадки стружки z от

отношения касательных напряжений q_{F}/r_{J}

по результатам обработки

экспериментальных данных Н.Н.Зорева [1]

о силах резания и усадке стружки



(11)

Рис. 8 – Влияние истинного сдвига на среднее касательное напряжение в условной плоскости сдвига по результатам расчета для стали *S*_b = 950 *МПа*, *m* = 0,15, зависимость предела прочности от температуры деформации аппроксимировалась экспонентой.

Из этого следует, что именно увеличение температуры передней поверхности вызывает уменьшение предела текучести на передней поверхности, которое в свою очередь для сохранения равновесия сил в зоне стружкообразования и на передней поверхности приводит к уменьшению усадки стружки.

На основании вышеизложенных фактов касательные напряжения в зоне стружкообразования и температура деформации, а также касательные напряжения и температуры на передней поверхности необходимо рассчитывать с учетом их взаимовлияния, т.е. на основе термомеханического подхода.

Первая задача может быть решена при допущении об адиабатичности процесса деформации в зонах A[¢], Б и Г (см. рис. 3). При этом температура деформации определяется простым соотношением

$$\Delta T' = \frac{A_{W}}{C_{V}}, \quad A_{W} = \frac{1}{T_{w}} \int_{0}^{z_{p}} \tau_{p} d\varepsilon$$

(12)

Зависимость предела текучести от деформации следует определять интегрированием уравнения (8) с учетом (12) и с учетом действительных зависимостей предела прочности материала от температуры. Максимальные значения предела текучести в зоне стружкообразования и на передней поверхности не зависят от конечного истинного сдвига, тогда как среднее касательное напряжение в зоне стружкообразования в общем случае зависит от конечного истинного сдвига (рис. 8).

При этом расчетные результаты лучше согласуются с экспериментальными зависимостями [1], чем результаты, полученные по моделям (1) и (3).

Выводы.

Деформация оказывает на удельную работу и на предел текучести деформируемого материала не только непосредственное влияние, как упрочняющий фактор, но и косвенное разупрочняющее влияние через изменение температуры деформации, а также косвенное упрочняющей влияние через изменение коэффициента динамичности (через температурноскоростной фактор).

Использование удельной работы деформации в качестве зависимой переменной в определяющем уравнении при адиабатических условиях деформации позволяет исключить из этого уравнения такие факторы как температура деформации и предел текучести и получить путем интегрирования этого уравнения зависимости удельной работы от деформации в явном виде.

Максимальные значения предела текучести в зоне стружкообразования и на передней поверхности достигаются при выравнивании интенсивностей упрочнения и разупрочнения деформируемого материала.

Локализация деформаций в узкой области вызывает стабилизацию предела текучести на уровне, соответствующем конечной температуре деформации, меньшем, чем максимальное значение предела текучести, определенное из условия выравнивания интенсивностей упрочнения и разупрочнения.

То, что максимальные значения предела текучести на передней поверхности 4 и в зоне стружкообразования 🕯 в

отличие от средних напряжений у не зависят от конечного истинного сдвига (и прочих условий резания), свидетельствует о целесообразности использования их в качестве действительных механических характеристик обрабатываемого материала при резании.

Максимальные касательные напряжения на передней поверхности превышают напряжения в условной плоскости сдвига.

Список литературы: 1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. –М.: Машгиз, 1956, 368 с. 2. Розенберг А.М., Еремин А.Н., Элементы теории процесса резания металлов.-М.:Машгиз, 1956, 319 с. 3. Развитие науки о резании металлов. Колл. авт. – М.: Машиностроение, 1967. – 420 с. 4. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента –М.:Машиностроение, 1969, 148 с. 5. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных металлов. Иркутск. Изд-во Иркутского университета, 1982. 180 с. 6. Спаанс. С. О линиях течения, распределении напряжений, деформации и скорости деформации и об устойчивости в первичной зоне сдвига при резании металлов.- Конструирование и технология машиностроения, (Trans. of ASME) 1962, №2, 204 с.

7. Васим С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании/ С.А.Васин, А.С.Верещака, В.С.Кушнер.: Учеб. для техн. вузов. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001.-448 с.: ил.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

В. И. Лавриненко, д-р техн. наук, М. Н. Шейко, канд. техн. наук, О. О. Пасичный, канд. техн. наук, А. П. Максименко, Киев, Украина В. А. Энгель, Николаев, Украина

АЛМАЗНЫЕ ПРЕЦИЗИОННЫЕ ПРАВЯЩИЕ РОЛИКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГТД: ЭКСПРЕСС-МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ СИЛ АЛМАЗНОЙ ПРАВКИ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

Пропонується методика іспитів сложнофасоних прецизійних правлячих роликів за схемою квазіврізного виправлення, що імітує істинно врізну і не потребує дорогого спеціального устаткування, а дозволяє використовувати універсальне. Названа схема одержує обґрунтування як у плані самопогодженості теоретико-експериментальних підходів до вивчення врізного виправлення, так і в плані ефективності використання абразивного матеріалу в модельних експериментах.

The technique of tests of shaped precision ruling rollers not demanding the expensive special equipment is considered. The developed technique has received experimental acknowledgement and will well be co-ordinated with the theoretical approach to process of precision editing.

В турбостроении особое место среди методов финишной абразивной обработки занимает врезное фасонное шлифование, осуществляемое профильными кругами, и являющееся одним из самых перспективных видов высокопроизводительной прецизионной технологии обработки элементов лопаток турбин. Врезное шлифование профильными кругами с использованием алмазных правящих роликов, работающих в условиях периодической или непрерывной правки, обеспечивает обработку с минимальным припуском не только фасонных, но и координатносвязанных между собой поверхностей. При этом прецизионность обработки преимущественно определяется точностью изготовления алмазных правящих роликов.

Институт сверхтвердых материалов НАН Украины плодотворно сотрудничает в этом направлении с государственным предприятием Государственное предприятие Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Заря-Машпроект», разрабатывая и производя прецизионный алмазный правящий инструмент для операций обработки замочных елочных профилей лопаток турбин широкой номенклатуры (рис. 1). На стадии разработки в Институте проводятся экспериментальные работы по доводке и испытаниям своей продукции. В связи с этим актуальной является разработка экспересс-метода испытаний алмазных роликов, поскольку в процессе отработки их конструкции и технологии нанесения алмазно-абразивного слоя возникает необходимость испытаний лабораторных образцов инструмента в условиях, максимально приближенных к производственным. Однако оборудование, реализующее врезную схему правки фасонными роликами, недопустимо дорого и громоздко для эксплуатации в лабораторных условиях.

В настоящей работе предлагается методика испытаний роликов, не требующая дорогостоящего специального оборудования, а позволяющая использовать универсальное. Обосновывается целесообразность предлагаемой методики, предложен новый метод регистрации сил правки и приводятся результаты их исследования на различных режимах резания, а также сравнение их с расчетными данными [1, 2].



Рис. 1 – Прецизионные алмазные правящие ролики с елочным профилем для замочной части лопаток ГТД

Для моделирования врезной правки на круглошлифовальном станке 3Б151 был модернизирован автономный привод ролика, устанавливаемый на столе станка и обеспечивающий скорость ролика $n_p=16,4$ M/c, что при скорости круга $n_k=29$ M/c соответствовало режимам правки, применяемым в производственных условиях.

Экспериментальный ролик Ø140 имел рабочий профиль с цилиндрической калибрующей средней частью и профильные участки, содержащие фрагменты различной кривизны, по обоим краям. Профильные участки имели занижение $Dt = 10 \ MKM$ по отношению к калибровочной части. Ролику по отношению к кругу, помимо вращения, сообщалась осевая возвратно-поступательная подача S с подачей на глубину t_0 на каждый ход стола. Осевая подача S выбиралась из условия

S>L,

(1)

где L – длина профильного участка, что обеспечивало независимый съем абразива каждым фрагментом этого участка, как это происходит при врезной правке без осевых подач. В этом суть *квазиврезной* правки, имитирующей врезную. Калибрующий участок, идущий следом за профильным, выбирает на круге многозаходную резьбу, образуемую профильным участком. При обратной осевой подаче вступает в работу профильный участок на другом краю ролика, его подача на глубину меньше (на высоту занижения) фактической подачи $t_{\rm d}$, установившейся для калибровочного

участка. Доля абразивного круга, диспергированная профильным участком и приходящаяся на единицу его длины, составляет

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right) \frac{1}{S}$$

(2)

(4)

Для сравнения – доля круга, приходящаяся на единицу длины испытываемого участка ролика, при истинно врезной правке составляет 1/*H*_{кр}, где *H*_{кр} – высота круга, что меньше чем (2). С учетом того, что каждый из профильных участков использует половину круга, эффективность использования абразивного материала при испытании ролика на износ при квазиврезной правке выше, чем при истинно врезной в

$$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta t}{t_0} \right) \frac{H_{xy}}{S} \text{ pas}$$

Подставляя значения $Dt = 10 \cdot 10^{-3} \text{ мм}, t_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ мм}, H_{\text{кp}} = 63 \text{ мм}, S = 1,38 \text{ мм},$ получаем преимущество в 11,4 раза, то есть в 11,4 раза более эффективно используется диспергируемый круг.

В серии экспериментов для регистрации сил резания правился круг Ø600 марки 24A25CM1K5 при указанных скоростях ролика и круга и подачах t_0 =0,020...0,030 мм, S=1,38 мм (U=26 мм/с). Кроме того, направление вращения ролика изменялось, осуществляя встречную (q=-1,77, где q= $n_{k'}/n_p$) и попутную (q=+1,77) правку. Условное напряжение резания-царапания абразива круга указанной марки составляло [3]:

$$\sigma_{yz} = 237 \left(0, 20 \exp \left(-0.173 \left(v_{yz} - 15 \right) \right) + 0.80 \right), H/mm^2$$

где n_{pe3} – скорость резания, м/с. Характеристики рабочего слоя калибрующего пояска, вносящего исключительный вклад в суммарную силу правки, были следующие: алмазный порошок AC125T 630/500, n_c = 2,4 мм⁻², a = 1,587, b = 0,5, h_{nc} = 0...0,02 [4].

Идея регистрации сил правки заключалась в регистрации падения частоты вращения вала асинхронного электродвигателя автономного привода ролика. Как известно [5], механическая характеристика асинхронного двигателя, то есть зависимость крутящего момента *M* на валу от скольжения *s* двигателя описывается выражением

$$M = \frac{2M_{\mathbf{x}}}{\frac{5}{s_{\mathbf{x}}} + \frac{5_{\mathbf{x}}}{s}},$$
(3)

где M_к – максимальный момент двигателя, s_к – критическое скольжение. Откуда зависимость мощности от скольжения

$$N = M\omega = \frac{2M_{\mathbf{x}}}{\frac{s}{s_{\mathbf{x}}} + \frac{s_{\mathbf{x}}}{s}} \omega_{\mathbf{x}} (1-s),$$

где *W* – угловая скорость, *a* – синхронная угловая скорость двигателя. При малых абсолютных значениях *s*, меньших значения номинального скольжения *s*_{ном}, мощность линейна скольжению

$$N = \frac{2M_{\mathbf{x}}\omega_{\mathbf{0}}}{s_{\mathbf{x}}}s$$

Поэтому легко рассчитать мощность, снимаемую с вала (расходуемую на резание и потери в приводе ролика) и приходящуюся на единицу падения частоты вращения двигателя n, мин⁻¹. С учетом $s=1-n/n_0$, $n_0=60W_0/2p$ имеем

$$\left|\frac{\Delta N}{\Delta n}\right| = \frac{\Delta N}{\Delta s} \left|\frac{\Delta s}{\Delta n}\right| = \frac{2M_{\mathbf{x}}\omega_{\mathbf{0}}}{s_{\mathbf{x}}} \frac{1}{n_{\mathbf{0}}} = \frac{\pi}{15} \frac{M_{\mathbf{x}}}{s_{\mathbf{x}}}.$$

Подставляя в последнем выражении $M_{\rm K} = |M_{\rm HOM}$ и $s_{\rm x} = (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) s_{\rm xxx}$ [5], где $M_{\rm HOM}$ и $s_{\rm HOM}$ – номинальный момент и скольжение двигателя соответственно, окончательно имеем

$$\left|\frac{\Delta N}{\Delta n}\right| = \frac{\pi}{15} \frac{1}{1 + \sqrt{1 - 1/\lambda^2}} \frac{M_{\text{max}}}{s_{\text{max}}}, \quad \frac{\text{Br}}{\text{of/MRH}}$$
(5)

В нашем случае номинальная мощность и обороты двигателя *N*_{ном}=1,1кВт и *n*_{ном}=940об/мин соответственно,

чему отвечают значения
$$M_{\pi =} = \frac{60}{2\pi} \frac{1100}{940} = 11,17 \text{ H} \cdot \pi_{\text{и}} s_{\pi =} = 1 - \frac{940}{1000} = 0,06$$
. Кратность максимального момента для данного $\left|\frac{\Delta N}{\Delta n}\right| = 19,9...20,5 \frac{\text{Вт}}{\pi 5 \text{ (merc)}}$

класса двигателей лежит в пределах I=2,3...3,4. Для этих значений получаем ^[Δn] об/мин и принимаем 20 <u>Бт</u> об/мин и принимаем 20

Силовые и энергетические расчеты плоскоременной передачи производились в соответствии с [6]. Существенное отличие схем нагружения привода при двух видах правки заключалось в том, что при встречной правке ведомый шкив (что на валу ролика) дополнительно нагружался моментом сил правки, направленным противоположно вращению. При этом ведущая ветвь ремня получала бо́льшую нагрузку, но направление передачи энергии (от шкива двигателя к шкиву ролика) не менялось. При попутной же правке шкив ролика нагружался моментом, сонаправленным с вращением, ведущая и ведомая ветви ремня менялись ролями, а направление передачи энергии менялось на

противоположное – от шкива ролика к шкиву двигателя. Это означало, что составлении мощностного баланса при встречной правке мощность резания (более точно – мощность сил резания на валу ролика) N_p меньше величины прирашения мощности на валу двигателя DN на величину потерь в ременной перелаче:

$$N_n = h \cdot DN.$$
 (6)

При попутной правке, наоборот, часть мощности резания теряется в ременной передаче на пути к двигателю:

 $N_{\mathbf{p}} = \frac{|\Delta N|}{\eta}, \tag{7}$

где приращение мощности на валу DN – отрицательная величина.

Таким образом, выше представлена методическая часть перехода от зарегистрированной величины изменения частоты вращения двигателя к мощности резания при правке. Графическое изображение этой функции *время-число* оборотов во время правки представлено на рис. 2.



Рис 2 – Экспериментальный график время-число оборотов вала ведущего двигателя

Результаты обработки экспериментальных данных следующие. При встречной правке зафиксировано падение частоты вращения вала двигателя от частоты вращения на холостом ходу (с присоединенным приводом) до рабочей частоты (при максимальных установившихся силах резания): |Dn|=994-990=4 об/мин. Соответствующее приращение

и мощность резания (по формуле (6)) N_p =0,7.80 Вт=56 Вт.

При попутной правке приращение частоты вращения вала двигателя от холостого хода до рабочей частоты

$$|\Delta N| = 20 \frac{BT}{c6/mm} \cdot 5 c6/mm = 100 BT$$

Dn=998-993=5 об/мин, падение мощности на валу $^{\circ 6/мин}$, мощность резания (по (7)) $N_p=100$ Br/0,3=333 Br.

Кроме того, экспериментально установлено: наступление установившегося режима, когда силы резания достигают максимального значения, происходит не сразу – только за три касания инструмента (три продольных прохода) (см. рис. 2).

Теоретические представления о квазиврезной правке как частном случае алмазно-абразивной обработке базируются на механико-статистическом подходе к рассмотрению данных процессов. При правке по такой схеме механизм накопление неудаленного припуска за ряд последовательных осевых проходов по существу такой же, как и при врезной правке алмазными брусками [7]. В нашем случае, при наличии осевой подачи *S*, длина H_p разбивается на int(H_p/S) участков, имеющих различную степень нагрузки, условия работы каждого определяются параметрами; $m=0,1,...,m_{max}$, где $m_{max}=int(H_p/S)$ -1. В нашем случае $m_{max}=4$. За каждый *k*-тый проход любая точка заправляемого круга

подвергается контактированию со всеми участками, причем съем за проход dh и фактическая подача на глубину t_{ϕ} [7], как показывают расчеты, стабилизируются лишь к 3-му проходу.

В соответствии с установившимся значением t_{ϕ} рассчитывались нагрузка каждого из 5-ти участков ролика (таблица). Суммируя тангенциальные составляющие сил резания на всех участках, получены искомые силы правки.

М	Встречная правка		Попутная правка	
	Тангенциальная составляющая		Тангенциальная составляющая силы правки	
	силы правки			-
	на единицу ширины контакта 1/3 Г_, <u>Н</u>	на <i>т</i> -том участке <i>T</i> _m , Н	на единицу ширины контакта $\frac{1}{\delta} \Gamma_{\bullet}, \frac{H}{MM}$	на <i>т-</i> том участке <i>T</i> _m , Н
0	2,120	2,93	6,45	8,90
1	0,531	0,733	3,75	5,18
2	0,202	0,279	2,28	3,15
3	0,102	0,141	1,464	2,02
4	0,0614	0,085	0,986	1,36

Таблица 1 - Тангенциальные составляющие сил резания, по участкам правящего ролика

$\sum 4,16$ (<i>P</i> = 4.16H)	$\sum_{(P_{r}=20,6H)}$
(- 2)	(- <u>L</u> - • ; •)

Соответствующие мощности встречной и попутной правки N_p=4,16 H·16,4 м/с=68 Вт и N_p=20,6 H·16,4 м/с=338 Вт. Указанные цифры свидетельствуют: расчеты, базирующиеся на механико-статистическом подходе к описанию алмазно-абразивной обработке, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, предлагаемая схема квазиврезной правки получила в работе обоснование в плане самосогласованности теоретикоэкспериментальных подходов к изучению врезной правки и в плане эффективности использования стандартного оборудования и абразивного материала в модельных экспериментах.

Благодаря совместной с «Заря-Машпроект» научно-поисковой работе, в том числе, проведению экспериментальных работ, описанных выше, институт может гарантировать высокую точность изготовления методом гальванопластики правящих роликов (допуск радиального биения – до 5 мкм, торцевого – до 3 мкм) и качество обрабатываемой поверхности — Ra=0,63. Оптимальный выбор зернистости и марки алмазных порошков обеспечивает повышенную стойкость и приемлемую цену правящего инструмента.

В данном направлении Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины успешно сотрудничает и изготавливает алмазные прецизионные правящие ролики не только с ГП НПКГ «Заря-Машпроект», но и с рядом российских предприятий: ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение» (г. Казань), ОАО «Специальное конструкторское бюро турбонагнетаттелей» (г. Пенза), ОАО «Моторостроитель» (г. Самара).

Список литературы: 1. Шейко М. Н. Динамика съема припуска при шлифовании периферией круга на стадии врезания и выхаживания: фактор инструмента и режима обработки // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 4. – С. 52–57. 2. Шейко М. Н. Сила шлифования в свете теоретиковероятностных представлений о процессе // Современные процессы механической обработки и качество поверхностей деталей машин: Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ НАН Украины, 1998. – 198 с. – С. 172 – 175. 3. Полупан Б.И., Байкалов А.К. Силы резания при правке абразивных кругов алмазным зерном // Синтетические алмазы. – 1978. – Вып. 3. – с. 58–61.

4. Микроскопические характеристики поверхностного слоя правящего ролика и способы их измерений / М. Н. Шейко; Редкол. журн. «Сверхтвердые материалы» АН УССР, АН Украины. – Киев, 1991. – 12 с. ил. – Библиогр. 9 назв. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 18.07.91, № 3074–В91.

5. Чиликин М.Г. Сандер А С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

6. Основы конструирования и детали машин. Глава 14. Ременные передачи. – МГТУ им. Н. Э. Баумана. Кафедра РК-3. 7. Шейко М Н., Максименко А.П. Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Установившаяся фактическая подача на глубину при многократных проходах // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 4. – С. 86–91.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

А. Х. Маджид, д-р техн. наук, А. Н. Михайлов, Донецк, Украина

ВЛИЯНИЕ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И ФРАКТАЛЬНУЮ РАЗМЕРНОСТЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ

Finishing processing of the pieces (samples) which cutted from the spiral drills that made of steel P6M5 determined the influence caused by vacuum ion-plasma coatings on the roughness, surface microhardness and fractal dimension of the different operations like : grinding, sandblasting, polishing and ultrasonic treatment (for cleaning). Coating leads to an increase in microhardness and fractal dimensions of the surface at all the different operations treatment. Influence of coating on the surface roughness is very clear reduced and how its depends on the parameters of surface roughness parameter.

1. Введение

Для изготовления различных изделий и выполнения сложных операций технологического процесса в современном машиностроении все большее применение находит инструмент с вакуумными ионно-плазменными покрытиями. В настоящее время разработано множество технологических процессов изготовления лезвийных инструментов с вакуумными ионно-плазменными покрытиями [1, 2, 3].

Современные проблемы машиностроения ставят задачи не только поиска новых технологий обработки материалов, но и новых методов оценки их свойств, к числу которых относится и микрорельеф поверхностей. Особо актуален этот вопрос в области нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий.

На сегодняшний день традиционной характеристикой шероховатости поверхности являются геометрические параметры - среднеарифметическое отклонение, максимальная высота неровностей, средний шаг неровностей профиля и т.п. [4]. Но, как отмечают некоторые исследователи [5], несмотря на успешное использование этих показателей, все-таки требуются новые подходы в оценке свойств микрорельефа поверхностей, которые отображали бы не только ее амплитудные характеристики, но и ее структуру.

Одним из путей решения этих проблем является использование основных положений теории фракталов, которые освещены в ряде работ [6, 7]. В качестве дополнительной характеристики микрорельефа поверхности предлагается использовать т.н. фрактальную размерность, которая оценивает степень «дробности», изломанность, самоподобие рельефа.

Целью работы является определение влияния нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на шероховатость, микротвердость и фрактальную размерность поверхности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующую задачу: на основании схемы технологического процесса дополнительной отделочной обработки спиральных сверл определить шероховатость, микротвердость и параметры фрактальной размерности поверхностей на каждой стадии обработки.

2 Основное содержание работы

Рассматриваемый процесс дополнительной отделочной обработки спиральных сверл с вакуумными ионноплазменными покрытиями состоит из следующих операций:

шлифования поверхности;

- пескоструйной обработки;

- полировки поверхностей, которую применяют для улучшения параметров шероховатости после пескоструйной обработки;

- ультразвуковую обработку, применяющуюся для очистки поверхностей перед нанесением покрытий;

- нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий TiN.

Экспериментальные исследования по оценке параметров шероховатости, микротвердости и фрактальной размерности поверхностей, по предлагаемым операциям технологического процесса проводили на образцах (рис. 1), вырезных из режущей части спиральных сверл диаметром 14 мм из стали Р6М5 (ГОСТ 10902-77).

Шлифование проводили на шлифовальном станке. В качестве инструмента применяли круг шлифовальный типа ПП (ГОСТ 2424-83) из белого электрокорунда 24А, зернистостью 16-П, степени твердости С2, со структурой №7, на керамической связке К5. В качестве смазывающей охлаждающей жидкости была применена жидкость, приготовленная из концентрата УНИЗОР-М.

Для проведения пескоструйной обработки было использовано устройство для пескоструйной обработки осевого лезвийного инструмента. В качестве абразивного материала использован песок кварцевый размером частиц 400 мкм, насыпной плотностью 2,868 г/см². Давление воздуха в пескоструйном аппарате не менее 0,4 МПа, диаметр сопла 3,4 мм, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности сверла 20 мм. Длительность обработки 20 с.

Процесс полировки выполняли с использованием станка для полировки осевых лезвийных инструментов. Обработку вели при скорости вращения 3000 об/мин. В качестве инструмента применяли круг войлочный. Обработку вели с использованием пасты ГОИ до получения на поверхностях характерного блеска.

Обезжиривание и очистку проводили на установке для комплексной ультразвуковой обработки осевых лезвийных инструментов. В качестве источника колебаний применена установка ультразвуковых колебаний УЗГ 3-4 и магнитострикционные преобразователи ПМС 2,5-18, смонтированные на специальных ваннах. В качестве очистного раствора в ванне применяли раствор следующего состава: тринатрийфосфат технический – 30-40 г/л; сода кальцинированная техническая 20-30 г/л; поверхностно активное вещество ОП-7 или ОП-10 – 3,5 г/л. Температура раствора 50-60 °С.



Рис. 1 – Поверхность образцов с вакуумными ионно-плазменными покрытиями, нанесенными после различных операций комбинированной отделочной обработки спиральных сверл (увеличение ×50)

Для нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытий ТіN применяли установку ННВ 6.6-И1. Суммарная толщина покрытия из 12 слоев – 6 мкм.

Измерение шероховатости производили при помощи профилографа-профилометра 252. Для получения фотографий и изучения состояния поверхности использовали металлографический микроскоп Neophot 2. Проведение фрактального анализа поверхностей образцов проводили при помощи программного продукта Fractal 3.4.7.2009 (Япония), который производит фрактальную оценку поверхности по ее изображению.

Для определения влияния нанесения покрытий, проводили нанесение покрытий после каждой стадии обработки. Поскольку наносимые вакуумные ионно-плазменные покрытия имеют малую толщину ~ 6 мкм, они как видно из фотографий рис. 1 повторяют микрогеометрию поверхности на всех стадиях комбинированной отделочной обработки.

Также из рис. 1 видно, что ультразвуковая обработка изменяет характер микрогеометрии поверхности с нанесенным покрытием. Таким образом, как показано, каждый этап рассматриваемого технологического отделочной обработки до нанесения покрытий оказывает влияние на качество поверхности инструмента с нанесенными вакуумными ионно-плазменными покрытиями.

Для количественной оценки состояния обработанных поверхностей провели измерение их шероховатости, микротвердости и определение фрактальной размерности поверхности без покрытий и с нанесенными покрытиями. В табл. 1 приведены изображения при увеличении ×100 поверхностей перед нанесением покрытий и после нанесения, а также соответствующие им значения фрактальной размерности и шероховатости.

Таблица 1 – Вид поверхностей (×100), фрактальная размерность D и шероховатость Ra поверхностей сверл на различных стадиях отделочной обработки до и после нанесения покрытий

Подготовка поверхности	Подготовка поверхности Без нанесения покрытий	
Шлифование		
	Ra = 0,490 мкм, D = 2,4652	Ra = 0,548 мкм, D = 2,5036
Шлифование, пескоструйная обработка		

		Продолжение таблицы
Шлифование, пескоструйная обработка, полировка		
	Ra = 0,027 мкм, D = 2,3033	Ra = 0,07 мкм, D = 2,4988
Шлифование, пескоструйная обработка, полировка, ультразвуковая обработка		
	Ra = 0.027 MKM $D = 1.9155$	Ra = 0.07 мкм. $D = 2.5473$

По данным шероховатости и фрактальной размерности, представленных в табл. 1, построены графики распределения шероховатости и фрактальной размерности по операциям отделочной обработки спиральных сверл (рис. 2 и рис. 3).

Как видно из рис. 2, пескоструйная обработка повышает шероховатость после шлифования почти вдвое. Последующая полировка значительно уменьшает шероховатость поверхности, а ультразвуковая обработка не оказывает влияния на шероховатость.



Рис. 2 – Влияние состояния поверхности и нанесения покрытий на шероховатость поверхности образцов по операциям отделочной обработки

Как видно из рис. 2, пескоструйная обработка после шлифования повышает шероховатость почти в двое. Последующая полировка значительно уменьшает шероховатость поверхности. Ультразвуковая обработка, как видно, не оказывает влияния на шероховатость. Однако на изображениях поверхностей, приведенных на рис. 1 и табл. 1 видно, что характер микрогеометрии после ультразвуковой обработки изменился по сравнению с состоянием после полировки и до нанесения покрытий и после нанесения. Таким образом, показано, что оценку влияния ультразвуковой обработки при помощи параметра шероховатости Ra не возможно. Также нанесение покрытий неоднозначно влияет на шероховатость поверхностей. Нанесение покрытий увеличивает шероховатость после шлифования, полировки и ультразвуковой обработки и уменьшает после пескоструйной обработки. Причем уменьшение шероховатости после пескоструйной обработки изменение незначительное.



Рис. 3 – Влияние состояния поверхности и нанесения покрытий на фрактальную размерность микрорельефа поверхностей по операциям комбинированной отделочной обработки осевых лезвийных инструментов

Как видно из рис. З нанесение покрытий приводит к увеличению фрактальной размерности. Также видно, что не зависимо от исходного состояния поверхности, фрактальная размерность, после нанесения покрытий имеет приблизительно одинаковый уровень в отличие от состояния поверхности без покрытий, где наблюдается тенденция к уменьшению фрактальной размерности. Причем наибольшее изменение фрактальной размерности зафиксировано после ультразвуковой обработки, которая не оказала влияния на шероховатость поверхности.



Рис. 4 – Влияние состояния поверхности и нанесения покрытий на микротвердость поверхности образцов по операциям отделочной обработки

Из рис. 4 видно, что нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий увеличивает микротвердость поверхности в среднем в три раза на всех этапах отделочной обработки. Влияние исходного состояния поверхности на микротвердость после нанесения покрытий не значительно.



Рис. 5 – Фрактальная размерность участков поверхности микрорельефа с заводской заточкой (увеличение ×100)

На рис. 5 представлены результаты расчета фрактальной размерности участков поверхности микрорельефа после заводской заточки.

Каждое изображение поверхности разделяют на девять участков. Для каждого участка определяется значение

фрактальной размерности, после чего определяют среднее значение для всего изображения. Как видно из рисунка микрорельеф с точки зрения фрактальной размерности является неоднородным.

Выводы

Таким образом, полученные результаты позволяют оценить влияние разных видов обработки на формирование микрорельефа поверхности используя в качестве характеристик оценки шероховатость, микротвердость и фрактальную размерность. Как видно нанесение покрытий приводит к увеличению микротвердости и фрактальной размерности поверхности на всех стадиях отделочной обработки. Влияние же нанесения покрытий на шероховатость поверхности не однозначное. И зависит от исходных параметров шероховатости до нанесения покрытий.

Такая характеристика представляется очень важной с точки зрения анализа регулярности и структурированности микрорельефа поверхности. Учитывая тот факт, что фрактальная размерность поверхности очень тесно связана с физическими свойствами поверхности, как это показано в работе [5], то открываются хорошие перспективы использования представленной методики для оценки качества поверхностного слоя деталей машин на основе фрактальной размерности поверхности.

Список литературы: 1. Внуков Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент. – Киев, Тэхника, 1992. – 143 с. 2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение: 1993, 336 с.

3. Панфилов Ю.В., Беликов А.И., Иванчиков И.В. Тонкопленочные покрытия на инструменте: анализ современного состояния и тенденции развития. Электронные, ионные и плазменные технологии. Приложение. Справочник. Инженерный журнал № 1, 2000, 12-16. 4. Качество машин: Справочник. В 2 т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с. 5. А.А. Потапов, В.В. Булавкин, В.А. Герман и др. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур. // Журнал технической физики, 2005, том 75, вып. 5. – С. 28-45. 3. Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с. 6. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с. 7. П.А. Шиляев, Д.А. Павлов, А.Ф. Хохлов, В.Г. Шенгуров. Связь фрактальной размерности и свойств поверхности поликристаллического кремния // Нано- и микросистемная техника, №6, 2003. – С. 30 – 35.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

А.Г. Мамалис, д-р техн. наук, Афины, Греция;С.Н. Лавриненко, канд. техн. наук, Харьков, Украина ;Е.Е. Запорожченко, канд. физ.-мат наук, Днепропетровск, Украина М.С. Дунайчук, канд. физ.-мат наук, Днепропетровск, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛИНЫ КОНТАКТА РЕЖУЩИХ КРОМОК ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОДАЧИ И ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ

Збільшення довжини контакту крайок леза інструмента з оброблюваним матеріалом при зміні геометрії його ріжучої частини і зміна параметрів режиму різання істотно впливають на ріст деформаційних навантажень і величину сили тертя, а також на збільшення рівня виникаючих температур у різних точках зони контакту. Дана стаття присвячена моделюванню довжини контакту крайок гостроверхого та радіусного інструмента з оброблюваним матеріалом у залежності від величини подачі і глибини різання.

The contact length increase of cutting tool edges with a processed material at change of its cutting part geometry and parameters of cutting essentially influence growth of deformation loadings and size of friction force, and also on increase in a level of arising temperatures accompanying these phenomenon in various points of a contact zone. This article is devoted to modelling of contact length of cutting edges for single-point and radius tools with a cut material depending on feed value and cutting depth.

Увеличение длины контакта режущих кромок лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом при изменении геометрии его режущей части и изменение таких параметров режима резания, как подача и глубина существенно влияют на рост деформационных нагрузок и величину силы трения, а также на сопровождающее эти явления увеличение уровня возникающих температур в различных точках зоны контакта. Рост уровня температуры, возникающей в процессе резания термопластичных полимеров, выше допустимых значений приводит к преждевременному образованию трещин серебра в поверхностном слое обработанных изделий, ухудшая эксплуатационные характеристики и, соответственно, сокращая срок их службы.

Принципиально можно рассматривать две схемы формообразования профиля обработанной поверхности в зависимости от профиля проекции режущих кромок инструмента на основную плоскость. Первая схема (см. рис. 1) предполагает отсутствие радиуса при вершине резца (или, вернее, пренебрежение его величиной в реальной размерной шкале), т.е. это схема так называемого островершинного резания. Вторая схема предполагает наличие радиуса различной величины при вершине резца (рис. 2).

Так как следы главной режущей кромки резца в основной плоскости параллельны, то согласно схеме, представленной на рис. 1, угол B_ICB_0 равен углу AB_IC , как это внутренние накрест лежащие углы, т.е.:

$$\angle BCB_{n} = \angle AB_{n}C = 120^{\circ}$$
.

(1)

Таким образом, из прямоугольного треугольника ΔDB₁A имеем:

$$\sin \angle DB_1 A = \sin 45^{\bullet} = \frac{AD}{AB_1} = \frac{t}{l_1}.$$

Отсюда длина контакта главной режущей кромки с обрабатываемым материалом:



Рис. 1 – Схема контакта режущих кромок островершинного лезвия режущего инструмента с обрабатываемым материалом Из треугольника ΔB₁B₀C по теореме синусов имеем соотношение:

$$\frac{B_1 B_0}{\sin 120^*} = \frac{B_1 C}{\sin 45^*} \,. \tag{3}$$

Подставив $B_1 B_0 = s_{H} B_1 C = l_{2}$, получаем:

$$\frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{l_1}{\sqrt{2}}$$

Таким образом, длина контакта вспомогательной режущей кромки с обрабатываемым материалом будет равна:

$$l_1 = \frac{\sqrt{2 \cdot s}}{\sqrt{3}} \tag{5}$$

Суммарная длина контакта режущей кромки будет равна:

$$l_1 + l_2 = \sqrt{2} \cdot t + \frac{\sqrt{2} \cdot s}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}(\sqrt{3} \cdot t + s)}{\sqrt{3}} \approx 0,82(1,7 \cdot t + s)$$
(6)

Если принять ширину контакта кромки задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом как величину h, то площадь контакта режущей кромки $S_{p.\kappa}$ будет равна:

$$S_{ps} \approx 0,82(1,7 \cdot t + s)h$$

(4)

(7)

В случае радиусной формы участка главной режущей кромки величина ее длины будет равна произведению величины радиуса при вершине резца r на угол AO₁C, который стягивает дуга окружности AC, как видно из расчетной схемы (рис. 2):



Рис. 2 – Схема контакта радиусной режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом

Тангенс угла между двумя прямыми, проходящими через отрезки О₁С и О₁А (угол поворота против часовой стрелки):

$$tg\Psi = \frac{K_1 - K_1}{1 + K_1 K_1} = \frac{K_{\mathbf{a},\mathbf{a}} - K_{\mathbf{a},\mathbf{c}}}{1 + K_{\mathbf{a},\mathbf{a}} \cdot K_{\mathbf{a},\mathbf{c}}},$$
(9)

где: ^Кол, ^Кос - угловые коэффициенты соответствующих прямых.

Привяжем расчетную схему к прямоугольной системе координат xOy и найдем величину отрезков $K_{0,i}, K_{0,c}$.

$$K_{\boldsymbol{a}_{i}\boldsymbol{C}} = \frac{y_{\boldsymbol{C}} - y_{\boldsymbol{a}_{i}}}{x_{\boldsymbol{C}} - y_{\boldsymbol{a}_{i}}} = \frac{y_{\boldsymbol{C}}}{x_{\boldsymbol{C}}},$$
(10)

где: *^xс*, *^yс* - координаты точки *C* в выбранной системе координат;

 x_{q} , y_{q} - координаты точки O_{l} , при этом $x_{q} = y_{q} = 0$

Находим координаты точки C(x_C; y_C), как точки пересечения двух дуг окружностей радиусом r с центрами в точках O₁(0;0) и O₀(s;0), где s - величина подачи. Для этого решим систему, составленную из уравнений данных окружностей:

$$\begin{cases} x^{2} + y^{2} = r^{2} \\ (x - s)^{2} + y^{2} = r^{2} \end{cases}$$
(11)

Преобразовав второе уравнение системы и вычитая из первого уравнения второе, получаем:

$$-\frac{\left\{x_{c}^{2}+y_{c}^{2}=r^{2}\right\}}{\left\{x_{c}^{2}-2x_{c}s+s^{2}+y_{c}^{2}=r^{2}\right\}}}{2x_{c}s-s^{2}=0},$$
(12)

откуда получаем выражения для координат *кс* и *кс*:

$$x_e = \frac{s^2}{2s} = \frac{s}{2}; \quad y_C = \sqrt{r^2 - x^2} = \sqrt{r^2 - \frac{s^2}{4}} = \sqrt{\frac{4r^2 - s^2}{4}} = \frac{\sqrt{4r^2 - s^2}}{2}$$

Таким образом координаты точки ${\it C}$:

$$C\left(\frac{s}{2}; \frac{\sqrt{4r^2 - s^2}}{2}\right),\tag{13}$$

а угловой коэффициент Кас получаем по формуле (10)

 $K_{O,C} = \frac{\sqrt{r^2 - s^2/2}}{s/2} = \frac{\sqrt{r^2 - s^2}}{s}$

Для нахождения углового коэффициента отрезка прямой O₁A используем формулу, аналогичную формуле (10):

(14)

(18)

$$K_{0,4} = \frac{y_A - y_{0,1}}{x_A - y_{0,1}} = \frac{y_A}{x_A} , \qquad (15)$$

где: ^{*х*}, ^{*у*}, - координаты точки *А* в выбранной системе координат;

^ха, ^уа- координаты точки
$$O_I$$
, при этом ^ха = ^уа = 0

$$y_{\mathbf{A}} = \mathbf{r} - \mathbf{f} \quad (16)$$

где: *г* - радиус при вершине резца;

t - глубина резания.

Γακ κακ
$$x_A < 0$$
, το:
 $x_A = -\sqrt{r^2 - y^2} = -\sqrt{r^2 - (r - t)^2} = \sqrt{r^2 - r^2 + 2rt - t^2} = \sqrt{2rt - t^3}$. (17)

Тогда по формуле (15) находим угловой коэффициент

$$K_{O_1A} = \frac{r-t}{-\sqrt{2rt-t^3}} = \frac{t-r}{\sqrt{2rt-t^3}}$$

Возвращаясь к формуле (9) находим тангенс угла контакта радиусной кромки инструмента:

$$tg\Psi = \frac{K_{Q,A} - K_{Q,C}}{1 + K_{Q,A} \cdot K_{Q,C}} = \frac{\left(\frac{t - r}{\sqrt{2rt - t^2}} - \frac{\sqrt{4r^2 - s^2}}{s}\right)}{\left(1 + \frac{(t - r) \cdot \sqrt{4r^2 - s^2}}{s \cdot \sqrt{2rt - t^2}}\right)} = \frac{s(t - r) - \sqrt{2rt - t^2} \cdot \sqrt{4r^2 - s^2}}{s\sqrt{2rt - t^2} + (t - r)\sqrt{4r^2 - s^2}}$$

т.е.:

T(- + -)T(

$$\Psi = \operatorname{cerctg}\left(\frac{s\left(t-r\right) - \sqrt{2rt - t^{2}} \cdot \sqrt{4r^{2} - s^{2}}}{s\sqrt{2rt - t^{2}} + \left(t-r\right)\sqrt{4r^{2} - s^{2}}}\right)$$
(19)

Известно, что при малых значениях угла имеет место приближенное равенство:

$$\Psi = tg\Psi - \delta, \text{ rge } \delta \to 0 +, \tag{20}$$

$$\Psi \approx \frac{s(t-r) - \sqrt{2rt - t^2} \cdot \sqrt{4r^2 - s^2}}{s\sqrt{2rt - t^2} + (t-r)\sqrt{4r^2 - s^2}}.$$
(21)

Тогда длина контакта радиусной режущей кромки с обрабатываемым материалом будет выражена следующей зависимостью:

$$s_1 + s_2 \approx r \cdot \frac{s(t-r) - \sqrt{2rt - t^2} \cdot \sqrt{4r^2 - s^2}}{s\sqrt{2rt - t^2} + (t-r)\sqrt{4r^2 - s^2}}$$
(22)

Таким образом, созданы геометрические модели длины контакта режущих кромок островершинного и радиусного лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом в зависимости от величины подачи и глубины резания, что позволит численно оценить степень влияния изменении геометрии режущей части и параметров режима резания на изменение площади контакта и, следовательно, оценить возможное изменение деформационных нагрузок, величины силы трения и уровня возникающих в зоне резания температур. Направлением дальнейших исследований является численное моделирование реальных процессов лезвийной обработки функциональных поверхностей изделий из различных материалов.

Поступила в редколлегию 25.06.2009

И.В. Манаенков, Кременчуг, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПНЕВМОУДАРНОЙ ШТАМПОВКОЙ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Проведено дослідження точностных показників розділових операцій пробивання – вирубки на пневмоударном устаткуванні. Установлено показники погрішностей при високошвидкісних операціях пробивання - вирубки, визначені причини їхнього виникнення, характер і ступінь впливу на точність штампованих деталей.

Precision values of punching-cutting shearing operations with the use of the air-percussion equipment have been analyzed. Error values under high-speed punching-cutting operations, the cause of their initiation, pattern and level of influence on the precision of the cutout have been determined.

Постановка проблемы. Важной задачей различных отраслей машиностроения в условиях рыночного хозяйствования является выпуск высококачественных изделий при одновременном повышении производительности труда и снижении трудоемкости производства. В случае листоштамповочного производства этим требованиям в полной мере по сравнению с традиционной шпамповкой, отвечает метод высокоскоростного формообразования на основе технологии и оборудования пневмоударной штамповки (ПУШ) жидкостью и эластичной средой [1-4]. В тоже время широкая реализация на практике технико-экономических преимуществ и положительных особенностей метода ПУШ препятствует отсутствие научно-обоснованных практических рекомендаций по оценке точностных возможностей этого метода шгамповки.

Цель исследования. Провести анализ и оценку точностных возможностей метода ПУШ при выполнении разделительных операций (пробивка-вырубка) для различных материалов.

Методика исследования. В основу принятой методики исследования точности изготовляемых деталей при ПУШ положен метод, основанный на применении законов математической статистики и теории вероятности, что позволяет получить объективные и достоверные данные, а также определить не только конечные погрешности, являющиеся суммой случайных и систематических погрешностей, но и провести анализ кривых распределения производственных погрешностей, которые по своему существу являются величинами случайными, подчиненными этим законам. Исследования проводились по следующим этапам: установление типа точностной диаграммы процесса; выявление влияния на точность процесса основных факторов (геометрических размеров деталей, формы, толщины материала, износа инструмента и др.); суммарное воздействие всех обнаруженных факторов на точность штамповки.

Точностные диаграммы строились для каждого типа штамповой оснастки (пробивка, вырубка), а для их построения диаграмм определялись средние значения величины отклонений размеров деталей в выборках.

Размеры отштампованных деталей измерялись на инструментальном микроскопе УИМ-21, шероховатость поверхности среза определялась при помощи микроскопа МИС-11и профиломера-профилографа модели 252, величина заусенцев - микрометром и оптиметром, что обеспечило точность замеров 0,01 мкм, отклонение от плоскости при помощи индикаторов на поверочных плитах.

В качестве заготовок для исследования применялся листовой материал марок: сталь 08КП, алюминий АМГ-М, сталь 1Х18Н1ОТ.

Толщина материала изменялась в следующем диапазоне: от 1,5 до 3мм.

Для обеспечения постоянно действующих случайных факторов на рассеивание размеров деталей, вырубкапробивка производилась при одной установке технической оснастки и автоматическом получении размера.

Результаты исследования. В соответствии с изложенной выше методикой были проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния износа режущего инструмента (матриц и пуансонов) на точностные характеристики процесса вырубки-пробивки.

Допуски габаритных размеров деталей по чертежам соответствовали 9-11 квалитетам точности. Допуски на толщину листа соответствовали стандартам на металл. За критерий качественного износа штампа принимались высота заусенца на кромке вырубаемой детали или пробиваемого отверстия, равная 0,2мм.

При установлении величины износа копир-пуансонов и матриц пользовались линейным методом измерения, т.е. отклонением фактических размеров режущих частей от их номинальных значений. Контроль износа режущих частей штампа и высоты заусенца проводился через каждые 1000 штук отштампованных деталей.

Матрицы и копир-пуансоны были изготовлены из стали У8А с последующей термообработкой до твердости HRC 56-62

На основании проведенных исследований и полученных результатов построены точностные графики процессов вырубки-пробивки, а именно зависимости средних отклонений размеров штампованных деталей от их количества для различных материалов и толщин.

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что с ростом количества отштампованных деталей происходит увеличение отклонений размеров от их номинальных значений. Это увеличение связано с износом рабочих элементов (копир-пуансонов и матриц). При этом размеры копир-пуансонов уменьшаются, а размеры матриц увеличиваются. Абсолютные же величины отклонений не зависят от вида операций, их величины как при вырубке, так и при пробивке, практически одинаковы в каждой из взятых выборок.

Следует отметить, что процесс ПУШ при выполнении разделительных операций принципиально отличается от изготовления деталей в специальных инструментальных штампах, при котором отклонения размеров при вырубке увеличиваются, а при пробивке отверстий — уменьшаются как по направленности, так и по величине. При выполнении пробивных операций в специальных штампах отклонение размеров на 20-30% больше чем при вырубке [5].

Полученные зависимости имеют практически линейный характер. В пределах штамповки партии деталей до 10 тыс. штук отсутствуют период приработки, а также не наблюдается период ускоренного износа, имеющие место при штамповке на специальной оснастке.

Это можно объяснить спецификой процесса ПУШ, отличающегося высокими скоростями деформирования и применением в качестве одного из рабочих элементов (матрицы или пуансона) эластичной деформирующей среды(полиуретана).

При шпамповке партий деталей в пределах 10 тыс. штук эти зависимости можно считать линейными.

Шероховатость поверхности среза отштампованных деталей находится для стали толщиной 2-3 мм. в пределах 3,2-8,4 (по пояску) и 6,3-12,8 (по сколу) и в количественном отношении не зависит от числа отштампованных деталей. В процессе штамповки происходит только ее качественное изменение, которое выражается в некотором сглаживании размера поверхности среза (блестящий поясок).

Другие точностные параметры, такие как плоскостность, отклонение от параллельности в процессе пневмоударной шпамповки не претерпевают значительных изменений и по своей величине находятся в пределах: угол

Одним из основных факторов, определяющих износ копир-пуансонов в условиях ПУШ, который оказывает доминирующее влияние на точностные параметры деталей, является правильный выбор материала для его изготовления.

Заключение. Экспериментально исследованы и получены критерии и показатели, определяющие точность листовых, получаемых пневмоударной пробивкой – вырубкой. Установлено, что в отличии от штамповки с применением инструментальных штампов в процессе ПУШ изменение размеров детали, как при вырубке, так и при пробивке происходит в сторону увеличения.

Список литературы: 1. Фролов Е.А. Формообразование жаропрочных материалов в условиях пневмоударного нагружения // Авиационнокосмическая техника и технология. – Труды ХАИ, 2002. – Вып. 30. – С. 147-150. 2. Фролов Е. А., Манаенков И. В., Дякова Т. В. Оценка качественных показателей деталей из листа при операциях пробивки – вырубки эластичной средой на пневмоударном оборудовании // 36. наук. праць. - Харків: УкрДАЗТ, 2008.- Вып.99. - с.250-256. 3. Фролов Е. А., Тимофеев С. С., Манаенков И. В., Дякова Т. В. Пути повышения качества технологической системы пневмоударной штамповки деталей // 36. наук. праць. - Харків: УкрДАЗТ, 2008.- Вып.88. - с.116-122. 4. Манаенков И.В., Мовшович А.Я., Буденный М.Я. Распределение погрешности при выполнении разделительных операций ПУШ // Сб. науч. трудов. – Харкюв: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 88. – с. 41 – 44.

Поступила в редколлегию 15.07.2009

В. А. Марунич, канд.техн.наук, А. Е. Проволоцкий, д-р техн. наук, В. В. Лелеко, А. Ю. Яриз, Днепропетровск, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Essentially new schemes of dimensional processing of viscoelastic polymeric materials are developed. The hypothesis about the mechanism of sliding milling of viscoelastic polymeric materials is formulated. The schematised physical model of sliding milling of polymeric materials is shown.

Наша страна вступила во всемирную торговую организацию, а это привело к жесткой конкурентной борьбе машиностроительных предприятий в условиях открытой рыночной экономики, что, несомненно, приводит к востребованности технологической науки. При этом открытие новых научных направлений, которые могут внести вклад в развитие технологии машиностроения как науки должно приветствоваться, поскольку это позволит машиностроителям создавать конкурентоспособные изделия.

Повышение конкурентоспособности изделий напрямую связано с улучшением свойств изделий, полученных в результате формирования поверхностного слоя при обработке резанием. Именно поверхностный слой детали определяет качественно новую совокупность свойств изделий (причина) и качественно новую меру полезности изделий (следствие).

В работе [1] проведен анализ развития технологии машиностроения как науки за последние 30 лет и сделан вывод, что в общем случае на качество поверхностного слоя при всех методах механической обработки (лезвийная, абразивная и отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием) оказывают влияние следующие факторы:

1. геометрия рабочей части инструмента и кинематика его рабочего движения относительно обрабатываемой поверхности;

2. колебательные перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

3. упругие и пластические деформации обрабатываемого материала заготовки в зоне контакта с рабочим инструментом;

4. шероховатость рабочей части инструмента;

5. вырывы частиц обрабатываемого материала.

Перечисленные факторы убедительно констатируют тот факт, что для создания прогрессивных технологий нового поколения необходимы новые нетрадиционные подходы, основанные на новых принципах реализации кинематики и механики процесса резания, что обеспечит повышение технологических возможностей метода обработки.

Основная научная проблема обработки материалов резанием заключается в том, чтобы энергию упругопластической деформации преобразовать в работу разрушения молекулярных или межатомных связей и таким образом максимально исключить диссипацию энергии, что позволит эффективно управлять процессом отделения срезаемого слоя. Известный метод традиционного фрезерования материалов не в полной мере решает поставленную задачу и технологический процесс включает дополнительные дорогостоящие операции финишной обработки.

Применение для обработки вязкоупругих полимерных материалов традиционных схем резания (рис 1, 2) не обеспечивает даже элементарных требований по качеству обработанной поверхности. Дело в том, что традиционная схема предполагает отделение срезаемого слоя в результате создания зоны напряженного состояния, обусловленной упругопластической деформацией. При этом стружка отделяется по плоскостям действия наибольших напряжений.

Для вязкоупругих материалов такая схема резания приводит к отрыву срезаемого слоя по направлениям разрыва молекулярных связей на определенной стадии упругонапряженного состояния. Поверхностный слой при этом характеризуется неупорядоченными (хаотическими) вырывами и сколами по кромкам, определяющими весьма низкие показатели качества. Для решения упомянутой проблемы необходимо разработать новый метод фрезерования материалов, который бы в полной мере рецал поставленную задачу.

В работе выдвигаются три новые схемы обработки вязкоупругих полимерных материалов [2,3,4], позволяющие управлять процессом отделения срезаемого слоя, с целью достижения основных технологических требований к обработанной поверхности, ее качества и точности.

Первая схема основана на реализации принципа торцового скользящего резания.

Вторая схема предполагает последовательное применение свободного резания в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Третья схема основана на реализации принципа винтового скользящего резания.

Первая схема (рис. 3) реализована за счет установления в режущем инструменте угла наклона режущей кромки λ более 70°. Режущая кромка в процессе обработки по этой схеме не только создает, как и в традиционной схеме, упругонапряженное состояние в зоне деформации, но и скользит по поверхности резания в направлении главного движения \mathcal{A}_2 .

На рисунке обозначено:

1. нож торцовой фрезы;

2. обрабатываемая поверхность;

3. режущая кромка;

3. заготовка из вязкоупругого полимерного материала;

 \mathcal{I}_{2} – главное движение резания; \mathcal{I}_{s} – движение подачи;

*P*_s – след статической плоскости резания; *P*_v – след статической основной плоскости.

В отличие от обычно применяемых схем для обработки металлов и отдельных полимеров с λ до 30°, в рассматриваемой схеме скользящего торцового фрезерования при λ более 70° создаются новые качественные соотношения в кинематике, когда определяющим движением становится скольжение режущей кромки по поверхности резания. Это условие определило новый процесс обработки вязкоупругих полимерных материалов. Более того, вышеупомянутая величина угла наклона кромки λ резко изменяет направление перемещения срезаемой стружки по передней поверхности лезвия и задает его новое положение в пространстве.



Рис. 1 - Схема традиционного торцового фрезерования



Рис. 2 – Схема традиционного цилиндрического фрезерования инструментом с винтовыми зубьями



Рис. 3 - Схема скользящего торцового фрезерования

Таким образом, в сравнении с традиционной схемой, значительно изменяются величины кинематических переднего γ_{κ} и заднего α_{κ} углов, а также кинематического угла заострения β_{κ} .Изменились размеры и форма сечения срезаемого слоя.

Вторую схему реализуют два автономно работающих ножей, выполняющих свободное резание (рис.4).

Один из ножей, названный подрезным 1 (рис. 4,а), непосредственно осуществляя скользящее резание, контактирует с обработанной поверхностью и решает при этом главную технологическую задачу обеспечения требований к качеству поверхностного слоя материала.

Второй нож, названный отрезным 2 (рис. 4,б), по существу выполняет вспомогательную функцию, связанную с отделением надрезанного слоя и в принципе может работать как по традиционной, так и по скользящей схеме резания.

Третья схема реализована за счет установления в режущем инструменте угла наклона винтового зуба более 70° (рис. 5). В отличие от традиционной схемы фрезерования инструментом с винтовыми зубьями (рис. 2), угол наклона которых не превышает 60° [5, 6] для металлов и некоторых полимеров, в предложенной схеме скользящего винтового фрезерования, при ω более 70° создаются, как и при выше рассмотренных схемах, новые качественные соотношения в кинематике и определяющим движением становится скольжение режущей кромки по поверхности резания.

Аналогично с первой схемой значительно изменились величины кинематических угловых параметров фрезы, размеры и форма сечения срезаемого слоя.

Механизм процесса резания материалов представляет собой сложный комплекс разнообразных явлений, затрагивающих многие области знаний. Из многообразия различных материалов наименее исследован процесс резания вязкоупругих полимерных материалов.

Вступая в контакт с обрабатываемым материалом, режущая кромка скользит по поверхности резания во время рабочего цикла. Следствием скольжения является трение по контактной поверхности. Это условие вызывает растягивающие напряжения в обрабатываемом материале. Начинается процесс зарождения и накопления

микродефектов типа волосных трещин в полимере непосредственно в местах контакта режущей кромки с обрабатываемым материалом. При достижении критических растягивающих напряжений в зоне контакта участка режущей кромки с полимером образуется макротрещина, которая пересекает плоскость нормальную к направлению приложенного напряжения.

При этом режущая кромка внедряется в обрабатываемый материал и за счет фрикционных сил происходит отрыв его микрочастиц. Таким образом, осуществляется разрыв молекулярных связей полимерного материала непосредственно перед режущей кромкой в плоскости резания.



Рис. 5 - Схема скользящего цилиндрического фрезерования

В этой связи существенно уменьшается величина упругой деформации, так как концентрация критических напряжений происходит непосредственно перед режущей кромкой и локализуется в плоскости резания.

Вместе с тем, врезаясь в обрабатываемый материал, точки режущей кромки перемещаются одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что создает условие стеснения подвижности молекулярных цепей и также уменьшение величины упругой деформации.

Таким образом, происходит аналогичный процесс известного уменьшения подвижности молекулярных цепей, как это имеет место при низкой температуре (криогенное резание) или высокой скорости деформации (высокоскоростное резание). В первом случае при понижении температуры цепные молекулы теряют свою подвижность и наступает стеклование и кристаллизация. Во вгором случае теряется подвижность молекул при высоких скоростях деформации из-за того, что цепные молекулы, в результате незначительного времени для их движения, не успевают перемещаться.

В результате очень значительного уменьшения упругой деформации, сопровождающей процесс скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов, снижается внутреннее трение, которое возникает когда молекулярные цепи меняют свои местоположения и их сегменты скользят относительно друг друга. При этом снижается диссипация энергии. Упругая энергия преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей. В этой связи следует ожидать понижение температуры резания.

Совокупность изложенных явлений определяет хрупкий срез или надрез вязкоупругого полимерного материала, происходящий без пластического течения.

Далее, в результате движения подачи, режущая кромка внедряется вглубь материала. Надрезанная часть его (стружка) перемещается по передней поверхности лезвия инструмента и надлом ее должен произойти за режущей кромкой. В противном случае, в результате силы, действующей на передней поверхности инструмента, будет создана большая зона напряженного состояния, обусловленная упругопластической деформацией, как это имеет место при традиционной схеме обработки и произойдет отрыв срезаемого слоя. Это приведет к образованию на обработанной поверхности вырыва. Таким образом, к числу основных факторов, определяющими тип стружки, следует отнести величину переднего угла, а для первой схемы и глубину резания.

Стружка будет сходить по передней поверхности под углом 90°-λ для торцового фрезерования и 90°-ω для цилиндрического.

При скользящем фрезеровании вязкоупругих полимерных материалов напряжения в подрезцовом слое не достигают критических значений и на обработанной поверхности не образуются трещины. Этому способствует малая величина угла заострения и малый радиус округления режущей кромки.

Следует отметить, что при обработке вышеупомянутых материалов будет иметь место упругое восстановление обработанной поверхности, что приведет к увеличению трения по задней поверхности инструмента.

В связи с этим задний угол должен выбираться таким, чтобы температура резания не превышала установленных норм для обрабатываемого материала и инструмента.

Рассмотренная гипотеза механизма процесса скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов

требует дальнейшего уточнения по ряду факторов, в том числе:

1. по роли шероховатости режущей кромки в протекании процесса скользящего резания;

2. величины, распределения и характер напряжений в деформируемой зоне;

3. изменений физико-химических свойств обработанного материала.

На основании вышеизложенной гипотезы о механизме скользящего фрезерования провели схематизацию физической модели указанного процесса.

Структурной основой физической модели процесса скользящего фрезерования полимерного материала, схематизированной на рис. 6, является учет скольжения режущей кромки по поверхности резания, в результате которого упругая энергия преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей.

Приведенная модель процесса скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов устанавливает главнейшие связи и условную последовательность проявления следующих физических явлений:

 Формирование контактной поверхности при скользящем взаимодействии режущей кромки с обрабатываемым материалом.

2. Механические растягивающие напряжения как результат скользящего силового воздействия

3. Малое внутреннее молекулярное трение и увеличенное внешнее трение по задней поверхности лезвия инструмента.

4. Теплообразование.

5. Стружкообразование, основанное на хрупком срезе.

6. Износ лезвия фрезы.

7. Образование поверхностного слоя.

Физическая модель процесса скользящего фрезерования полимерных материалов может быть упрощенно представлена следующим образом.

1. При скользящем воздействии лезвия инструмента на полимере из-за вязкоупругих свойств обрабатываемого материала, увеличенного рабочего участка лезвия инструмента и уменьшенного кинематического заднего угла формируются увеличенные фактические площадки контакта (I). Они предопределяют повышенное внешнее трение на задней поверхности лезвия инструмента и соответствующее тепловыделение (III). Однако температура резания невысокая вследствие малого внутреннего трения. В инструменте и полимере возникают циклические механические напряжения (II). В материале они приводят к разрыву химических связей.



Рис. 6 – Схематизация физической модели процесса скользящего фрезерования полимерного материала

2. Перераспределение сил, характерное для скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов, действующих на передней и задней поверхностях лезвия инструмента, соответствующий режим резания и толщина срезаемого слоя, а также новые геометрические параметры предопределили тип образующейся стружки (IV). Стружка непрерывная и требуется ее надлом или срезание.

3. Значительное уменьшение зоны упругой деформации и ее величины при скользящем фрезеровании определило формирование обработанного поверхностного слоя (V) без вырывов и сколов по кромкам.

Несмотря на весьма упрощенную физическую модель процесса скользящего фрезерования, приведенную выше, следует отметить сложность для изучения указанных явлений.

Многие авторы, в том числе работы [7] рекомендуют процесс резания, ввиду его сложности, изучать математическими методами планирования эксперимента, которые основаны на кибернетическом подходе к объекту исследования. Наиболее подходящей моделью при таком подходе является «черный ящик» (рис.7).

Площадки, входящие в объект, соответствуют возможным способам воздействия или факторам. Группа факторов, обозначенных буквами $X_{I}, X_{2}, ..., X_{K}$, соответствуют управляемым факторам, при изменении которых непосредственно изучается объект исследования.

Факторы $Z_{I_1}Z_{2_2}...Z_n$ и $W_{I_1}W_{2_2}...W_i$ представляют группу неуправляемых факторов, существенно увеличивающих ошибку эксперимента или шумовое поле, на фоне которого выделяется полезный сигнал. Факторы $Z_{I_2}Z_{2_2}...Z_n$ можно контролировать в процессе эксперимента, а факторы $W_{I_1}W_{2_2}...W_i$ относятся к возмущающим неконтролируемым воздействиям на объект исследования. Стрелки $y_{I_2}...y_m$ выходящие из объекта, соответствуют параметрам оптимизации.



Рис. 7 - Схема кибернетической модели процесса скользящего фрезерования

Кибернетический подход в планировании эксперимента позволяет фиксировать выходы, то есть параметры оптимизации, при варьировании факторов на нескольких уровнях. При этом не обязательно заботиться о механизме явлений, протекающих в «ящике». Это дает возможность определить связь между входом и выходом объекта исследования и описать указанную связь вполне определенной математической моделью, не рассматривая характер протекающих процессов.

Исследование кинематики процесса резания для приведенного метода обработки изложено в работе [8], а экспериментальная отработка рациональных геометрических параметров и режима резания в работе [9].

Выводы:

1. Разработаны принципиально новые схемы размерной обработки вязкоупругих полимерных материалов, основанные на использовании принципа скользящего резания, обеспечивающие полное выполнение основных технологических требований к качеству и точности обработанной поверхности.

2. Показано, что основой обеспечения принципа скольжения первой и второй схем, предназначенных для торцового фрезерования указанных материалов, является установление угла наклона режущей кромки $\lambda > 70^{\circ}$, а для третьей схемы, предназначенной для цилиндрического фрезерования, угла наклона винтового зуба $\omega > 70^{\circ}$.

3. Установлено, что резание должно быть свободным, а особенностью скользящего фрезерования является существенно большее различие между инструментальными угловыми параметрами и кинематическими по сравнению с традиционным фрезерованием.

4. Сформулирована гипотеза о механизме скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов и разработаны основные закономерности формирования параметров элементов срезаемого слоя и обработанного поверхностного слоя.

5. Показана схематизированная физическая модель скользящего фрезерования полимерных материалов, которая устанавливает главнейшие связи и последовательность процессов и явлений, сопровождающих обработку резанием вязкоупругих полимерных материалов.

Список литературы: 1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684с. 2. Патент України 19905. Спосіб обробки матеріалів різанням/ В.О. Марунич. Бюл.№1-2007. 3. Патент России 2031790. Способ обработки материалов резанием/ В.А. Марунич. Бюл.№1-1995. 4. А.С.1219387. Инструмент для механической обработки материалов/ В.Д. Дручков, В.А. Марунич, Г.Б. Горшков. Бюл.№11-1986. 5. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т.- Т.2. под ред. А.М. Дальского,

А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение – 1, 2001.

6. Тихомиров Р.А., Николаев В.И. Механическая обработка пластмасс. – Л.: Машиностроение, 1975. 7. Душинский В.В., Пуховский Е.С., Радченко С.Т. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. – Киев: Техника, 1977. 8. Марунич В.А. Исследование кинематики обработки резанием теплоизоляционных пенополиуретановых покрытий сферических изделий. Теория и практика металлургии. – 2007. №6. – С.53-58. 9. Марунич В.А. Экспериментальное установление эффективных условий фрезерования теплоизоляционных пенополиуретановых материалов. Системные технологии. – 2007. - №5(52). – С.104-111.

Мовшович А.Я., д-р техн. наук, Кочергин Ю.А., Буденный М.М., канд. техн. наук, Харьков, Украина

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСИЛИЕ ШТАМПОВКИ ПРИ П-ОБРАЗНОЙ ГИБКЕ

В статье рассмотрены новые подходы к определению усилия П-образной гибки с учетом комплекса действующих факторов. Предложены расчетные аналитические зависимости усилия штамповки.

Введение

Разработка технологических процессов гибки сопряжена с расчетом усилий, потребных для осуществления пластического деформирования заготовок. Определение усилий штамповки по известным формулам приводят к значительным погрешностям, достигающим 25-90%. При гибке деталей типа лонжеронов и им подобных, небольшие в процентном отношении ошибки достигают по абсолютному значению больших величин: сотен и даже тысяч тонн.

Операция гибки сопровождается изменением кривизны срединной поверхности в одной плоскости (плоскости изгиба) и для этого к заготовке необходимо приложить как минимум изгибающий момент, рис.1. Расчетные формулы по определению усилий при П-образной гибке построены на равенстве предельного момента пластического изгиба моменту внешних сил.

(1)

(2)

$$P_1 \cdot I = \frac{1}{4} \sigma_s \cdot S^a \cdot b$$

где: Р₁ – внешнее усилие, действующее на заготовку;

l - плечо силы;

 σ_S – предел текучести материала заготовки

S, b – толщина и ширина заготовки.

Переменными параметрами являются: внешнее усилие P₁ плечо l, которое изменяется при опускании пуансона. Плечо l, геометрический параметр, зависящий от угла загиба или хода пуансона. Точность определения плеча l существенно сказывается на точности расчета усилия P₁.

Для определения максимальной величины усилия P_1 необходимо знать положение пуансона или угла α , при котором $l = l_{min}$. Значение угла α , при котором $l = l_{min}$ определяется по формуле:

$$\alpha = \arcsin \frac{r_m + r_s + s}{r_m + r_s + s(1 + c)}$$

Для определения значений углов α , соответствующих наибольшим значением усилий P₁, была построена номограмма (рис. 2), в которой $\alpha = f [C;(r_m+r_n+s)]$. При одинаковом дополнительном зазоре (C=const), угол α возрастает по мере увеличения радиусов матрицы и пуансона. Угол α также увеличивается при уменьшении дополнительного зазора (C→min).



Усилие штамповки является вертикальной проекцией сил, действующих на заготовку (рис. 1). С учетом сил трения при двухугловой гибке

$$Pu = 2 P_1 (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \tag{3}$$

Решая уравнение (3) относительно P₁ и произведя все подстановки, получим формулу для определения усилия штамповки в стадии гибки полок:

$$P_{\mathbf{u}} = 0,5 \frac{\cos\alpha(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{(r_{\mathbf{u}} + r_{\mathbf{u}} + S)(1 - \sin\alpha) + CS} \sigma_{\mathbf{b}} \cdot S^{\mathbf{a}} \cdot b$$
(4)

где ^{СБ}- предел прочности материала заготовки при одноосном растяжении;

^{*µ*} - коэффициент трения.

Таким образом, усилие штамповки будет иметь наибольшую величину при таком угле, когда выражение

$$m = \frac{\cos\alpha(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{(r_{\pi} + r_{\pi} + S)(1 - \sin\alpha) + CS}$$
(5)

достигает максимального значения.



Рис. 2 – Номограмма для определения угла а

На рис. З приведено сравнение усилий штамповки, рассчитанных по формуле (5) с данными различных авторов по Смирнову – Аляеву; 1-

- 2по Мошнину;
- 3по Зубцову;
- 4-
- по Сгибневу Дряшину; 5фактические значения;
- 6по предлагаемой формуле.

Фактическое усилие гибки исследовалось в промышленных условиях. Эксперименты выполнялись на заводе СКМЗ. Гибка проводилась на кривошипном прессе К-2534 усилием 25 МПа.

Универсально – сборный штамп для изготовления П-образной детали размерами 90x135x160 был собран из комплекта стандартизированных деталей УСШ – 16.



Рис. 3 – Зависимость усилия штамповки от радиуса пуансона Радиусы матриц и пуансонов изменялись в широком диапазоне:

 $R_{\rm M} = 8; 10; 14 \text{ Mm}. P_{\Pi} = 4; 6; 8; 10; 14 \text{ Mm}.$

Толщина заготовок также изменялись в широком диапазоне: 5; 6; 8; 10 мм. В качестве штампуемого материала применялись стали ст.3; ст.20; 1Х18Н1ОТ. Гибка производилась со смазкой и без смазки. Фактически величины усилий штамповки и горизонтальные усилия замерялись специально разработанным прибором – двухкомпонентным пуансоном – динамометром. Одновременно записывался ход пуансона при помощи специального ходографа, в котором использовался ферродинамический преобразователь ПФ-1. Запись всех параметров осуществлялась на осциллографе Н- 700 с тензоусилителем ТА-5.

На рис. 4 показана зависимость плеча l от угла α для различных стадий гибки.



1, 2, 3, 4 – формовка полок, правка полок, калибровка донышка, обратный ход пуансона.

Операция П – образной гибки состоит из нескольких стадий, отличающихся деформированием того или иного элемента штампуемой детали. Стадии гибки сопровождаются разными сочетаниями силовых воздействий. Так, на первом этапе, в стадии гибки полок на заготовку действует два усилия: вертикальное (Р_ш) и горизонтальное (N).

Величины этих усилий возрастают от нуля до максимальных значений. При этом угол α не равен 90⁰. Затем в стадии правки полок усилия падают и с момента соприкосновения заготовки или выталкивателя с нижней плитой штампа (начало следующей стадии) Р_ш начинает возрастать. Этой стадии гибки соответствует калибровка радиусов и спинки. В стадии калибровки спинки на заготовку и элементы штампа воздействует, в основном, вертикальное усилие, которое

достигает наибольшего значения при крайнем нижнем положении пуансона,

$$P_{max} = (1, 3 \div l, 4) P_{uu} \tag{6}$$

а горизонтальное усилие имеет небольшую величину и им можно пренебречь. В стадии гибки полок усилия $P_{\rm m}$ и N возрастает синхронно до того момента, пока $P_{\rm m}$ не достигает наибольшего значения. После этого вертикальное усилие начинает падать, а горизонтальное растет до максимального. Усилия $P_{\rm m}$ и N сдвинуты по фазе на некоторый угол $\Delta \alpha$. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете прочности и жесткости штампов. Наибольшее усилие, по которому производится подбор пресса, будет соответствовать стадии калибровки спинки и при нормальной настройке штампа оно будет равно:

$$P_{\text{max}} = (0, 65 - 0, 7) \frac{\cos\alpha(\cos\alpha + \mu\sin)}{(r_{\text{m}} + r_{\text{m}} + S)(1 - \sin\alpha) + CS} \sigma_b \cdot S^3 \cdot b \tag{7}$$

 $V_{m} + r_{n} + \delta A^{1} - \delta B^{1} C \delta^{2}$ (7) Изменение r_n существенно сказывается на величине P_{III}. Прирост P_{III}, определенный по формуле (1), при изменении r_n от 14 до 4 мм составил 14 тс.

Исследование влияния r_n на величину P_{III} было выполнено аналитически и экспериментально. При этом все параметры кроме r_n были постоянными. Замер фактических усилий производился, как указано выше. Результаты расчетов и замеров изображены на графиках (рис. 3).

Существенно влияет на усилие штамповки дополнительный зазор CS, задаваемый коэффициентом C. Исследование выполнено аналитически для случая, когда $r_n = r_m = 14$ мм; S = 8 мм; b = 160 мм; материал – ст.3. Установлено, что с уменьшением зазора усилие возрастает. Причем, чем ближе абсолютное значение коэффициента C к нулю, тем больше прирост усилия P_{III} .

На усилие штамповки значительно влияет сила трения, регламентируемая нормальным давлением и коэффициентом трения μ, который можно определить экспериментально. Как известно, коэффициент μ зависит от большого количества факторов, и выбирать его необходимо для каждого конкретного случая. Была предпринята попытка установить значение μ экспериментально на действующем рабочем штампе при гибке черных горячекатаных заготовок из сталей: ст.3; ст.20 и 1Х18Н10Т. Для этого в процессе штамповки записывались усилия штамповки, горизонтальные усилия (N) и ход пуансона. По записанному ходу пуансона определялась стадия гибки, т.е. угол загиба α. На основе замеренных величин определялся коэффициент μ путем расчета по формуле:

$$\mu = \frac{p_{\rm m}\sin\alpha - 2N\cos\alpha}{P_{\rm m}\cos\alpha + 2N\sin\alpha} \tag{8}$$

В начальный момент гибки µ=0,12; затем его величина падает до µ=0,018; потом возрастает почти линейно до своего наибольшего значения (µ=0,405). В этот момент Р_ш=max.

При дальнейшем движении пуансона, когда прямолинейная часть пуансона попадает в прямолинейный участок матрицы, µ падает до значения µ=0,37÷0,38.

Таким образом, при расчете усилий гибки черных горячекатаных стальных заготовок должно приниматься значение μ=0,4 (μ было бы правильно называть коэффициентом сопротивления движению).

Выводы:

1. Операция П-образной гибки состоит из нескольких этапов, отличающихся деформированием того или иного элемента штампуемой детали. Существует три стадии: гибка полок, правка полок; калибровка радиусов и спинки. Каждая стадия характеризуется разными сочетаниями силовых воздействий на заготовку и элементы штампа.

2. Усилие штамповки является величиной переменной, зависящей от комплекса переменных: марки материала, геометрических размеров заготовки, коэффициента трения, геометрических параметров и настройки штампа. С увеличением относительных радиусов закруглений и дополнительных зазоров усилия штамповки уменьшаются.

3. Наибольшей величины усилие штамповки достигает в тот момент, когда центры кривизны закруглений матрицы и пуансона лежат на одной прямой. Стадия гибки при этом характеризуется углом α , который изменяется в широких пределах (от 60 до 88[°])и отыскивается по формуле (3) или номограмме (рис. 2).

Список литературы: 1. Романовский В.П. – Справочник по холодной штамповке. М-Л, Машгиз, 1965. – 380 с. 2. Смирнов-Аляев Г.А., Вайнтрауб Д.А. – Холодная штамповка в приборостроении. М.-Л. Машгиз, 1963. - 420 с. 3. Сгибнев В.Ф., Дряшин И.Б. – О способах расчета усилий при двухугловой гибке. // Кузнечно-штамповочное производство. 1969,- №4. – с. 45-52.

Поступила в редколлегию 15.07.2009

Є. В. Мироненко, д-р техн. наук,В. В. Калініченко, канд. техн. наук, Краматорськ, Україна

АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКІВ ІНТЕГРАЛЬНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО КРИТЕРІЮ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЧИСТОВОМУ ТОЧІННІ СТАЛЕЙ ТВЕРДОСПЛАВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ З РЕЖИМАМИ РІЗАННЯ ТА ПОПЕРЕДНЬОГО ЗМІЦНЕННЯ ТВЕРДОГО СПЛАВУ

In the articles presented basic theoretical approaches are to forming of the system of connections of integral power criterion of cutting process at the clean sharpening of staley by a hard-alloy instrument, citizen to previous strengthening influence, with the modes of cutting and strengthening of instrument.

Постановка проблеми

Неухильне збільшення питомої ваги чистової токарної обробки в структурі технологічних процесів виготовлення сталевих деталей-тіл обертання обумовлює актуальність розробки моделей для розрахунково-аналітичного визначення оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними пластинами. Враховуючи широке використання методів зміцнення та нанесення зносостійких покриттів для підвищення стійкості твердосплавного інструменту, особливо актуальною є розробка подібних моделей для твердосплавного інструменту, підданого попередньому зміцнюючому енергетичному впливу (ЗЕВ).

Універсальні теоретичні моделі для визначення оптимальних режимів різання повинні базуватись на розгляді процесу різання як комплексу взаємопов'язаних явищ, інтенсивність кожного з яких може бути виражена через єдиний інтегральний енергетичний критерій. Значна кількість взаємопов'язаних фізичних процесів при точінні сталей твердосплавним інструментом зі зміцненням або зносостійким покриттям та залежність інтенсивності їхнього протікання від режимів різання і властивостей поверхневого шару інструменту, набутих ним в результаті ЗЕВ, вимагає всебічного аналізу системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та ЗЕВ.

Аналіз досліджень та публікацій з проблеми, що розглядається

Розгляд процесу різання як комплексу взаємопов'язаних та взаємообумовлених фізичних явищ є загальною рисою робіт Ю. Г. Кабалдіна [1], В. С. Кушнера [2], О. Д. Макарова [3], С. С. Сіліна [4], В. К. Старкова [5], С. І. Тахмана [6], Л. Ш. Шустера [7], Ф. Я. Якубова [8] та інших. В якості параметрів, що обумовлюють інтенсивність фізичних явищ при різанні, в першу чергу – інтенсивність зношування інструменту, як основного фактору, що визначає працездатність різців при чистовому точінні, в розглянутих роботах використовуються показники, які за своєю сутністю є енергетичними: температура різання (показник, пов'язаний з кількістю теплової енергії в зоні різання) [3], накопичена внутрішня енергія поверхневого шару інструменту [8], прихована енергія деформування зрізуваного шару та прихована енергія деформування поверхневого шару обробленої деталі [5]. Теоретичні концепції та рекомендації, наведені в роботах [1–8], створюють широке поле рішень для вибору оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей твердосплавними різцями.

Разом з тим, в перерахованих роботах відсутній вичерпний аналіз взаємних зв'язків всіх фізичних процесів та енергетичних перетворень в зоні різання. Акцент зроблений на залежності інтенсивності зношування інструменту від безумовно важливих, але все ж таки часткових показників енергетичного стану зони різання, кожен з яких не може бути визнаний інтегральним енергетичним критерієм в силу нехтування тими чи іншими фізичними явищами, визнаними авторами концепцій як малозначимі. Вищевказане обумовлює необхідність розробки універсальної теоретичної моделі процесу різання, що враховувала б зв'язки всіх різних за природою фізичних явищ (та, відповідно, енергетичних перетворень), які впливають на інтенсивність зношування інструменту. У випадку точіння інструментом, підданим попередньому ЗЕВ, така модель повинна також враховувати вплив величини потоку енергії, що надходить до поверхневого шару інструменту при зміцненні або нанесенні покриття, спричиняючи трансформацію характеристик процесу різання та зміну інтенсивності зношування різця.

Загальні принципи розробки подібної моделі процесу різання для чистового точіння сталей твердосплавним інструментом зі зміцненням або зносостійким покриттям наведені в попередніх роботах авторів [9, 10]. В них передбачається вираження цільової функції та системи обмежень через інтегральний енергетичний критерій є процесу різання, що дорівнює співвідношенню питомої енергії відокремлення одиниці маси (об'єму) оброблюваного матеріалу (або питомої енергії утворення одиниці площі обробленої поверхні), та питомої енергії диспергування одиниці маси (об'єму) твердого сплаву при зношуванні різальної пластини.

Огляд невирішених частин проблеми

Розгляд комплексу фізичних та енергетичних явищ при різанні в проаналізованих роботах базується на виділенні одного найважливішого явища (комплексу явищ), що визначає інтенсивність зношування інструменту, при цьому впливом інших фізичних явищ на процес різання в тій чи іншій мірі нехтують. Режими різання, вибрані на основі рекомендацій цих робіт, можна вважати оптимальними лише з чітко вказаними припущеннями.

Наприклад, в роботі О. Д. Макарова [3] в якості показника, що справляє визначальний вплив на інтенсивність зношування інструменту та характеристики процесу різання, використовується температура різання. Такий підхід зводить енергетичний баланс зони різання до теплового балансу, при цьому не враховується нетеплова складова енергії процесу різання, яка, хоч і є незначною у порівнянні з тепловою, здатна серйозно впливати на фізичні процеси в контактних мікрооб'ємах матеріалів, зокрема на процес диспергування часток поверхневого шару інструменту. В роботі Ф. Я. Якубова [8], навпаки, більшу увагу приділено процесам зміни величини внутрішньої енергії в контактній зоні та поверхневому шарі інструменту і їхньому впливу на диспергування часток інструментального матеріалу. Наголос на ролі нетеплової складової енергії процесу різання в зношуванні інструменту, в свою чергу, призводить до нівелювання ролі теплових явищ в цьому процесі. В моделі процесу різання, розробленій В. К. Старковим [5],

ключовими характеристиками є значення прихованої енергії деформування зрізуваного шару та прихованої енергії деформування поверхневого шару обробленої деталі, а в якості основного комплексу явищ при різанні розглядається деформація матеріалу заготовки, при цьому нівелюється роль процесів тертя.

В проаналізованих роботах не приділяється окремої уваги енергетичному стану зони різання при обробці інструментом зі зміцненням чи покриттям та зв'язку інтенсивності фізичних явищ при різанні з величиною енергії, що надходить до поверхневого шару інструменту при ЗЕВ.

Універсальна модель процесу різання не може базуватись на домінуванні комплексу явищ тільки однієї фізичної природи. Інтегральний енергетичний критерій процесу різання повинен враховувати співвідношення інтенсивності всіх енергетичних перетворень в зоні різання. При цьому загальна величина зовнішньої енергії, яка надходить до зони різання, визначатиметься величиною роботи різних сил, що витрачається на здійснення стружкоутворення, тертя та інших фізичних процесів при різанні. В той же час величина внутрішньої енергії поверхневого шару різального інструменту, що братиме участь в контактних процесах та зазнаватиме зношування, формується за рахунок прирощення початкового значення внутрішньої енергії в результаті ЗЕВ; інтенсивність прирощення залежатиме від режимів ЗЕВ.

В зв'язку з вищевказаним, важливою задачею є аналіз системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та попереднього ЗЕВ.

Мета статті – на основі аналізу енергетичних перетворень при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними різальними пластинами зі зміцненням або зносостійким покриттям сформулювати систему зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та ЗЕВ.

Основна частина

При чистовому точінні стійкість інструменту і технологічні характеристики деталей визначаються інтенсивністю зношування різців. Відповідно, умовою оптимальності процесу різання має бути найменша питома інтенсивність зношування різців при відокремленні одиниці маси зрізуваного шару (або утворенні одиниці площі обробленої поверхні). Тому інтегральний енергетичний критерій ^в визначаємо як:

$$e = \frac{e_m}{e_d}$$
(1)
$$e = \frac{e_S}{e_d},$$
(2)

де ^е*m* – питома енергія відокремлення одиниці маси оброблюваного матеріалу;

еS – питома енергія утворення одиниці площі обробленої поверхні;

^{*e*}*d* – питома енергія диспергування одиниці маси твердого сплаву при зношуванні різальної пластини.

Основною задачею чистової токарної обробки, на відміну від чорнової та напівчистової, є не зняття якнайбільшого припуску, а утворення якнайбільшої площі нових поверхонь деталі заданої точності та якості за одиницю часу. Тому, при формулюванні виразу для інтегрального енергетичного критерію в кінцевому вигляді краще використовувати формулу (2). Але оскільки в системі зв'язків фізичних процесів в зоні різання визначальним процесом є зняття матеріалу заготовки з перетворенням його на стружку внаслідок пластичної деформації, і саме на здійснення цієї деформації витрачається найбільша складова механічної роботи сил в зоні різання [5], то в проміжних розрахунках при формуванні теоретичної моделі процесу різання може використовуватись формула (1). Однакова прийнятність формул (1) та (2) повинна базуватись на логічному зв'язку між процесами відокремлення матеріалу зрізуваного шару та утворення внаслідок цього нової поверхні, що може бути виражений принциповою залежністю типу:

$$e_5 = k \cdot e_m$$
 (3)

де k – коефіцієнт, що встановлює співвідношення між площею утвореної поверхні та масою знятого зрізуваного шару; Величини e_m , e_s та e_d можна визначити як:

$$e_{m} = \frac{E_{sp}}{m}; \qquad (4)$$

$$e_{s} = \frac{E_{sme,noe}}{S}; \qquad (5)$$

$$e_{m} = \frac{E_{sn}}{m_{d}}, \qquad (6)$$

де ^{*E*} зр. – сумарна енергія, що витрачається на зрізання шару матеріалу заготовки при різанні; ^{*E*} утв. пов. – сумарна енергія, що витрачається на утворення нових поверхонь при різанні; ^{*E*} зн. – енергія, що витрачається на диспергування часток інструментального матеріалу при зношуванні різців;

m – маса зрізуваного шару, видаленого в процесі різання; S – площа нових поверхонь, утворених в результаті різання;
 md – сумарна маса часток інструментального матеріалу, диспергованих при зношуванні інструменту.

Критерій є в виразах (1) та (2) трактуємо як співвідношення «корисної» та «шкідливої» складових енергії процесу різання. «Корисна» складова енергії витрачається на утворення нової поверхні (зняття зрізуваного шару), «шкідлива» – на зношування інструменту. Оптимальним умовам різання відповідає максимум є, тобто якнайбільша питома частка «корисної» складової в загальному енергетичному балансі зони різання. Згідно з (1–6)

$$e = \frac{e_S}{e_d} = \frac{k \cdot e_m}{e_d} = \frac{E_{pms.nos} \cdot m_d}{E_{sn} \cdot S} = k \cdot \frac{E_{sp} \cdot m_d}{E_{sn} \cdot m} \to \max$$

 $e_d e_d E_{3N} \cdot S E_{3N} \cdot m$ (7) Розглянемо енергетичний баланс в зоні різання при чистовому точінні сталей твердосплавним інструментом, підданим ЗЕВ. Згідно з роботою [8], закон збереження енергії в процесі різання виражається в перетворенні роботи A_{pis} різання на теплову енергію Q та внутрішню енергію деформації ΔU , яка, в свою чергу, складається з набутої в результаті різання внутрішньої енергії деформованих об'ємів стружки ΔU_{cmp} , робочих поверхонь інструменту ΔU_{incmp} та поверхневих шарів деталі ΔU_{dem} :

$$A_{pis} = Q \pm \Delta U = Q \pm \left(\Delta U_{cmp} + \Delta U_{incmp} + \Delta U_{dem} \right)$$
(8)

З урахуванням вищеперерахованого, рівняння (8) має вигляд:

$$A_{\partial e \phi} + A_{m,3} + A_{m,n} + U_{incmp} + \Delta U_{incmp_{3EB}} + U_{3a2} =$$

 $= \mathcal{Q}_{\partial e} \Phi_{cmp} + \mathcal{Q}_{\partial e} \Phi_{\partial em} + \mathcal{Q}_{m,n_{cmp}} + \mathcal{Q}_{m,n_{iucmp}} + \mathcal{Q}_{$

$$+\mathcal{Q}_{m,3}_{\partial em} + \mathcal{Q}_{m,3}_{incmp} + \mathcal{Q}_{\partial ucn} \pm \left[\Delta U_{cmp} + \Delta U_{incmp} + \Delta U_{\partial em} \right]. \tag{9}$$

Наведений вигляд рівняння враховує всі енергетичні чинники процесу різання різної фізичної природи. Для всебічного аналізу системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію є з режимами різання та ЗЕВ потрібно вирішити дві задачі:

1) аналіз зв'язків складових енергії, утвореної при різанні, з величинами E_{sp} , $E_{yme.noe}$, E_{sh} , і відтак, – з величиною e.

2) аналіз зв'язків вхідних параметрів (режимів різання та ЗЕВ) зі складовими енергії, що надходить до зони різання.

Першу задачу пропонується в загальному плані вирішувати виділенням в кожній зі складових правої частини рівняння (9) «корисної» та «шкідливої» частин, що можна відобразити як:

$$Q_{m,s} = \frac{P_{m,s}}{P_{m,s}} + Q_{m,s} + Q_{ducn} \pm \left(\Delta U_{cmp} + \Delta U_{incmp} + \Delta U_{dem} \right) = \sum_{i=1}^{n} Q_{\kappa op_i} + \sum_{i=1}^{n} Q_{m\kappa_i} + \sum_{j=1}^{m} \Delta U_{\kappa op_j} + \sum_{j=1}^{m} \Delta U_{m\kappa_j} , \qquad (10)$$

де $\mathcal{Q}_{\kappa op_i}$, ΔU_{mp_i} – «корисні» частини складових теплової енергії та прирощення внутрішньої енергії; \mathcal{Q}_{m} , $\Delta U_{m\kappa j}$ – «шкідливі» частини складових теплової енергії та прирощення внутрішньої енергії; n, m – кількість відповідно «корисних» та «шкідливих» частин складових енергетичного балансу.

«Корисною» частиною енергетичного балансу вважатимемо постійний для заданої пари «твердий слав – оброблювана сталь» мінімум теплової енергії чи будь-якого прирощення внутрішньої енергії, необхідний та достатній для утворення обробленої поверхні при знятті шару матеріалу з заданим перетином зрізу. Надлишок складової енергії, що перевищує цей мінімум, вважатимемо «шкідливою» частиною, яка витрачається на інтенсифікацію контактних процесів, і, відповідно, – на зношування інструменту. При виділенні «корисних» та «шкідливих» частин складових енергетичного балансу потрібно дотримуватись наступних правил:

теплові потоки $\mathcal{Q}_{m.n_{inemp}} = \mathcal{Q}_{m.s_{inemp}}$ належать до «шкідливих» частин, оскільки знижують механічні властивості твердого сплаву та інтенсифікують зношування інструменту;

кожен з теплових потоків $Q_{\partial e}\phi_{cmp}$, $Q_{\partial e}\phi_{dem}$, $Q_{m,n_{cmp}}$, $Q_{m,3}_{dem}$ розподіляється на «корисну» та «шкідливу» частини за принципом: $Q_{xop} = Q_{op}$; $Q_{ux} = Q - Q_{op}$, де Q – теплова енергія потоку, що розглядається; Q_{op} – критичний рівень теплової енергії даного потоку, що спричиняє початок дифузійного зношування контактного майданчику інструменту;

прирощення ΔU_{incmp} внутрішньої енергії при різанні розподіляється на «корисну» та «шкідливу» частини за принципом: $\Delta U_{incmp \ \kappa op} = \Delta U_{incmp \ \kappa p}$; $\Delta U_{incmp \ u \kappa} = \Delta U_{incmp \ -} \Delta U_{incmp \ \kappa p}$, $\Delta U_{incmp \ \kappa p} - \kappa p$ итичне прирощення внутрішньої енергії поверхневого шару інструменту, що викликає початок його знеміцнення;

прирощення внутрішніх енергій ${}^{\Delta U}cmp$ та ${}^{\Delta U}cmp$ та ${}^{\Delta U}cmp$ розподіляються на «корисну» та «шкідливу» частину за принципом: ${}^{\Delta U}m = {}^{\Delta U}m , {}^{\Delta U}m , {}^{\Delta U}m = {}^{\Delta U}m , {}^{\Delta U}m$ стружки або поверхневого шару деталі, після досягнення якого починається їхнє знеміцнення (це визначення приймається для випадків, коли окремо не оговорюються вимоги до зміцнення поверхневого шару деталі).

З урахуванням вищевикладеного приймаємо, що:

$$E_{sp} = E_{ymenoe} = \sum_{i=1}^{n} Q_{\kappa op_i} + \sum_{j=1}^{m} \Delta U_{\kappa op_j}, \qquad (11)$$
$$E_{sn} = \sum_{i=1}^{n} Q_{\omega \kappa_i} + \sum_{j=1}^{m} \Delta U_{\omega \kappa_j}. \qquad (12)$$

Друга задача вирішується встановленням залежності складових лівої частини рівняння (9) від режимів різання та ЗЕВ. Для цього вводимо поняття енергетичних функцій (ЕФ) режимів різання та ЗЕВ:

 $E\Phi$ режимів різання – сумарна кількість енергії, що надходить до зони різання в результаті роботи $A_{pis} = A_{\partial e}\phi + A_{m.s} + A_{m.n}$, і залежить від режимів різання (згідно з моделлю роботи [10] – оптимізовуваних параметрів 1-ої групи $x_i^{(1)}$, а також прийнятої як константа глибини різання t): $e_{p,pis} = A_{\partial e}\phi + A_{m.s} + A_{m.n} = f(x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}) = f(v, S, t)$

 $E\Phi$ режимів 3EB – енергія, що надходить до об'єму твердого сплаву при дії 3EB: $e_{p.3EB} = \Delta U_{incmp}{}_{3EB} = k_{emp} \cdot E_{3EB} = = f\left(x_1^{(2)}, ..., x_i^{(2)}, ..., x_n^{(2)}\right)$, де E_{3EB} – енергія 3EB, k_{emp} – коефіцієнт, який враховує втрати енергії 3EB, що не надійшла до поверхневого шару твердого сплаву під час його зміцнення або нанесення зносостійкого покриття, $x_i^{(2)}$ – режими 3EB (згідно з моделлю роботи [10] – оптимізовувані параметри 2-ої групи $x_i^{(2)}$).

Можливий перехресний вплив режимів різання та ЗЕВ на A_{pij} в разі потреби може бути врахований за допомогою спеціальної функції $F(v, S, t, x_1^{(2)}, ..., x_i^{(2)}, ..., x_n^{(2)})$, логіка введення якої базується на зміні A_{pij} в результаті зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару твердого сплаву після ЗЕВ.

З урахуванням вищевикладеного приймаємо, що:

$$A_{\partial e \phi} + A_{m,s} + A_{m,n} + U_{incmp_n} + \Delta U_{incmp_{3EB}} + U_{3a2} = e_{p,pis} + e_{p,3EB} + F(v,S,t,x_1^{(2)},...,x_n^{(2)}) + U_{incmp_n} + U_{3a2}$$
(1)

Згідно з (1–13), в загальному плані інтегральний енергетичний критерій ∉ процесу різання буде виражатись як:

$$e = k \cdot \frac{m_d}{m} \cdot \frac{E_{3p}}{E_{3n}} = k \cdot \frac{m_d}{m} \cdot \frac{(E - E_{3n})}{E_{3n}} = k \cdot \frac{m_d}{m} \times \frac{\left(e_{p,pis} + e_{p,3gg} + F\left(v, S, t, x_1^{(2)}, \dots, x_l^{(2)}\right) + U_{incmp_n} + U_{sag} - \sum_{i=1}^n \mathcal{Q}_{ux_i} - \sum_{j=1}^m \Delta U_{ux_j}\right)}{\sum_{i=1}^n \mathcal{Q}_{ux_i} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{ux_j}}.$$

Отриманий вираз може бути в подальшому використаний для розробки функцiональних залежностей інтегрального енергетичного критерію процесу різання від ЕФ режимів різання та ЗЕВ типу $e = f(e_{p.pis}, e_{p.3EB})_{i,}$ відповідно, залежностей e від режимів різання та ЗЕВ.

Висновки

В статті на основі аналізу енергетичних перетворень при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними різальними пластинами зі зміцненням або зносостійким покриттям була сформульована система зв'язків

інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та зміцнюючого енергетичного впливу (ЗЕВ). Ця система базується на принципах:

- представлення величини є як співвідношення питомих енергій утворення одиниці площі поверхні деталі та диспергування одиниці маси твердого сплаву при зношуванні різальної пластини;

- врахування в енергетичному балансі різання внутрішньої енергії контактних шарів інструменту і заготовки та прирощення внутрішньої енергії інструменту, деталі, стружки при різанні;

- представлення роботи різання як енергетичної функції режимів різання, а внутрішньої енергії поверхневого шару інструменту, підданого ЗЕВ, – як енергетичної функції ЗЕВ;

- вираження енергії, що витрачається на утворення нових поверхонь при різанні, та енергії, що витрачається на диспергування часток твердого сплаву при зношуванні різців, через спеціально виділені «корисні» та «шкідливі» частини в тепловій та нетепловій складових енергії, утвореної при різанні.

Список литературы: 1. Кабалдин, Ю. Г. Структурно-энергетический поход к процессу изнашивания режущего инструмента / Ю. Г. Кабалдин // Вестник машиностроения, 1990. – № 12. – С. 62–68. 2. Кушнер, В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов / В. С. Кушнер. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1982. – 196 с. 3. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с. 4. Силин, С. С. Мегод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с. 5. Старков, В. К. Дислокационные представления о резании метериалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 1979. – 158 с. 6. Тахман, С. И. Развитие теории изнашивания твердосплавных инструментов на основе термомеханики поведения их поверхностей при резании пластичных материалов. Автореферат дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – ГОУ ВПО «Российский унниверситет дружбы народов». – Москва, 2009. – 36 с. 7. Шустер, Л. Ш. Адгезионое взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л. Ш. Шустер. – М. : Машиностроение, 1988. – 96 с. 8. Якубов, Ф. Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов / Ф. Я. Якубов. – Ташкент : «Фан», 1985. –104 с. 9. Мироненко, С. В. Методологические принципы создания моделей для выбора режимов резания пластинами, подвергнутыми упрочняющему воздействию / Е. В. Мироненко, В. В. Калиниченко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – С. 256–267. 10. Мироненко, С. В. Загальні принципи розробки моделей для выбору оптимальних режимів різания при чистовому точінні сталей на основі використання енергетичного критерію / С. В. Мироненко, В. В. Колиниченко // Сучасні технологі в машинобудуванні [Текст] : зб. наук. праць. – Вип. 2. Редкол. : А. I. Грабченко (голова) [та ін.]. Харків : НТУ «ХПИ», 2008. – С. 48–57.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

С.А. Назаренко, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

The important component of designing, engineering and manufacturing are the sensitivity analysis of characteristics to small variations of constructive parameters. On the united science methodological base effective methods for the sensitivity analysis methods of systems are created. The complexes of theoretical, calculable and applied questions of sensitivity analysis are studied. The developed mathematical apparatus applications are examined.

Усовершенствование технологий изготовления, интенсификация рабочих процессов в современных конструкциях обуславливают необходимость высокого уровня интеграции наукоемких технологий виртуального моделирования [1-4]. Прогресс современной вычислительной техники позволяет исследовать проблему жизненного цикла инновационных изделий как результат взаимодействия огромного числа конструкторских, технологических и производственных факторов на основе совершенствования методического, программного, информационного и математического обеспечения. Сложность формулировки функционала полной ожидаемой эффективности жизненного цикла конструкций, включающего затраты, связанные с проектированием, подготовкой производства, изготовлением, коррективной эксплуатацией, отказом; противоречивость критериев, большое число разнохарактерных варьируемых переменных, неформализуемость некоторых ограничений, различная точность и детерминированность моделей, требования унификации не позволяют решать математически строго задачу оптимизации непосредственно для полной модели. Анализ чувствительности представляет информацию о направлении и скорости изменения критериев цели (функционалов качества) конструкций *J* при изменении варьируемых параметров *и* без модификации всей модели[5]. На базе анализа чувствительности можно решить целый ряд практических задач проектирования, доводки, технологической подготовки производства и контроля эффективной эксплуатации конструкций. Анализ чувствительности позволяет, с одной стороны, производить оперативные оценочные расчеты большого числа вариантов при стохастическом анализе, назначении полей допусков на изготовление, неразрушающем контроле, корректировке или идентификации математической модели конструкции; а с другой стороны, эффективно построить улучшенную вариацию в системах оптимального автоматизированного и интерактивного проектирования.

Целью данной работы была разработка на основе единой комплексной научно-методологической концепции методик анализа чувствительности конечномерных и континуальных моделей конструкций, обладающих высоким уровнем адекватности реальным физико-механическим процессам различной природы; решение на их основе ряда практических задач.

Современные машины создаются и функционируют как комбинация множества взаимодействующих между собой и с внешней средой конструктивных элементов. Практическое решение задач, как правило, сводится к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных. Обобщенное уравнение движения элементов (от одномерной модели до трехмерной) можно записать следующим образом

$$\mathcal{D}\left[\vec{V}\right] = \mathcal{Y}\left[\vec{V}\right] + \mathcal{H}\left[\vec{V}\right] + \vec{\tilde{\mathcal{R}}}\left[\vec{V}\right] - \vec{f} = 0, \qquad (1)$$

где $\vec{V}(\vec{x},t)$ - обобщенный вектор (функция) переменных состояния; \vec{x} - координатный вектор; \forall - оператор приведенных «жесткостных» характеристик, структура которого зависят от типа исследуемого явления, состава системы, граничных условий и условий сопряжения; H - приведенный «инерционный» оператор, \vec{R} - оператор диссипативных сил; $\vec{f} = \vec{f}(\vec{x},t)$ - вектор (функция) нагрузок; t - время. Под вектором (функцией) u варьируемых параметров понимаются характеристики физико-механических свойств материалов, присоединенных масс и жесткостей, геометрические размеры и т.п.

Возможности классических методов, базирующихся на решении системы уравнений в частных производных, определяющих краевые задачи математической физики, весьма ограничены. Краевая задача может быть приведена к вариационной форме[6]. Основные разрешающие уравнения для процессов, изменяющихся во времени, могут быть

непосредственно получены из обобщенного вариационного принципа Гамильтона-Остроградского $\delta \int (T - \Pi + W) dt = 0$, где T – кинетическая энергия системы, Π – потенциальная энергия (является наиболее важной энергетической характеристикой произвольной системы, выраженной через компоненты выбранного пространства состояний и при необходимости может включать, например, энергию электрической индукции для трехмерного пьезоэлектрического тела), W – работа приложенных сил. Вариационные методы приводят к матричной алгебраической проблеме и служат удобной основой для построения теоретически обоснованных расчетных схем. Задачи теории поля (теплопроводность, гидромеханика, расчет электрических или магнитных полей и т.п.) сводятся к системе уравнений, аналогичной соотношениям метода конечных элементов для задач механики деформируемого твердого тела.

На основе проведенных исследований были разработаны две базовые методики анализа чувствительности. Математическая постановка задачи заключается в определении производных от функционалов качества ^J по параметрам *u*. Первый подход предполагает следующую последовательность вычислительных этапов (формулы приведены для задачи статики):

1) конечноэлементная (КЭ) дискретизация задачи анализа (1)

$$A(\vec{u},\vec{y}) = K(\vec{u})\vec{y} - F(\vec{u}) = 0,$$

где \vec{y} , \vec{F} – «обобщенные» векторы узловых перемещений и нагрузок; $K(\vec{u})$ – «обобщенная» матрица жесткости конструкций; \vec{u} – вектор варьируемых параметров;

2) введение вектора сопряженных переменных

$$K^{\mathbf{T}}(\vec{u})\vec{\psi} = K(\vec{u})\vec{\psi} = \vec{g} = \vec{\nabla}_{\mathbf{F}}J, \qquad (3)$$

3) введение пространства варьируемых переменных;

4) вычисление градиентов от функционалов качества конструкций

$$\vec{\nabla}_{\mathbf{u}}J = \left\{ -\frac{\partial H^{\star}}{\partial u_{I}} = -\vec{\psi}^{T} \left(K_{\mathbf{u},\vec{y}}^{\prime} - \vec{F}_{\mathbf{u}_{I}}^{\prime} \right) + \frac{\partial J}{\partial u_{I}} \right\}_{\mathbf{F}\overline{\mathbf{I},\mathbf{u}}}, \tag{4}$$

где гамильтониан $H = \vec{\psi}^T \left(\mathcal{K}(\vec{u})\vec{y} - \vec{F}(\vec{u}) \right) - J(\vec{u},\vec{y})$.

Во второй методике сопряженные переменные вводятся непосредственно для вариационной или дифференциальной формулировки исходной задачи анализа (1). Далее редукция исходной и сопряженной задач (переход от непрерывных переменных к дискретным с одновременным избавлением от операций дифференцирования и/или интегрирования), дискретизация варьируемых функций формы конструкции; введение понятия материальной производной могут выполняться как формально несвязанные этапы.

Задачи на собственное значение λ (собственные колебания и потеря устойчивости) можно представить вариационным уравнением вида

$$a_u(y,z) = \lambda \ b_u(y,z) \tag{5}$$

для всех *z* из пространства Z гладких кинематически допустимых «обобщенных» перемещений (($a_u(y,z)$; $b_u(y,z)$ - положительно определенные и непрерывные билинейные формы; *y* –переменные состояния). Поскольку уравнение (5) однородно по *y*, необходимо добавить условие нормировки $b_u(y,y)=1$ для определения собственной функции единственным образом. Варьируя по *u* обе части уравнения (5), учитывая свойства симметрии $a_u(y,z)$ и $b_u(y,z)$; z=y; отбрасывая члены, равные 0; получим формулу для вычисления производной некратного собственного значения $\lambda = a'_u(y,y) - \lambda b'_u(y,y)$, где в правой части штрих обозначает вариацию билинейных форм по явно входящему аргументу *u*.

Преимуществом второй методики является то, что используются поля «обобщенных» перемещений, а не узловые параметры, определяемые матричными уравнениями. Для производных получаются явные выражения в терминах физических величин, а не в терминах сумм производных от матриц конечных элементов конструкций. Конечномерный и континуальный подходы связаны между собой (первый является аппроксимацией второго).

Предварительный анализ распределения коэффициентов чувствительности позволяет выделить зоны наиболее и наименее существенного влияния на критерии качества конструкций, вследствие чего появляется возможность выбрать минимальный набор варьируемых параметров. Использование коэффициентов чувствительности позволяет конструкторам оценивать влияние изменений параметров без постоянного обращения к трудоемким конечноэлементным расчетам. При пересчете модификаций конструкций деталей с малыми изменениями $\Delta \vec{u}$ от базового варианта \vec{u}_0 изменения критерия качества аппроксимируются линейными членами разложения функции в ряд Тейлора в окрестности параметров $J \approx J_0 + \vec{\nabla}_0^T J_0 \Delta \vec{u}$.

Для демонстрации разработанного математического аппарата рассмотрим несколько задач. Исследование вибраций корпуса двигателя представляет интерес в связи с возможным появлением форм резонансных напряжений, приводящих к образованию усталостных трещин. Эта задача непосредственно связана с анализом динамики охлаждения отливки, позволяющим выявить места возможного формирования внутренних усадочных дефектов; погрешности формообразования, определяющие закономерные и случайные изменения физико-механических свойств материалов и геометрических размеров [7]. При анализе качества ответственных отливок сложной геометрической формы в рамках так называемого «системного подхода» оценка качества не сводится лишь к контролю отсутствия литейных дефектов, а определяется из требований к литой детали как к элементу механической системы. При этом еще на стадии моделирования можно сопоставить зоны технологических дефектов при данной технологии изготовления с распределением полей коэффициентов чувствительностей функционалов качества, а затем провести меры по улучшению качества отливки.

В настоящей работе рассматривалась КЭ модель отливки блок-картера дизеля, образованная конечными элементами тетраэдральной формы. Граничные условия состояли из закрепления двух из трех степеней свободы узлов, расположенных на внешних торцевых к оси маховика плоскостях блок-картера. На рис. 1 и 2 с целью демонстрации предлагаемых подходов приведены примеры решенных задач. В качестве формы иллюстрации результатов сделана тоновая заливка на поверхности конструкций. Светлыми тонами показана зона близких к нулю коэффициентов чувствительности, темными - экстремальных. Выполненный анализ, в частности, выявил для второй формы собственных колебаний соответствие зон максимальных напряжений с областью развития усталостных трещин на работающих двигателях. Отметим, что, как правило, зоны наибольших коэффициентов чувствительности собственных частот к изменению приведенного модуля упругости совпадают с областями максимальных динамических напряжений. Улучшение качества поверхности в этих областях приводит к повышению предела выносливости, нанесение демпфирующих покрытий - к снижению уровня динамических напряжений.



Рис. 1 - Распределение полей коэффициентов чувствительностей первой собственной частоты к изменению приведенного модуля упругости на поверхности отливки блок-картера дизеля.

Рис. 2 - Распределение полей коэффициентов чувствительностей второй собственной частоты к добавлению присоединенных масс на поверхности отливки блок-картера

В современных сварочных установках с целью повышения производительности процесса и улучшения качества сварного шва применяются ножевые концентраторы-волноводы (рис.3). Обычно сонотроды такого типа используются в качестве второй ступени резонансной колебательной системы. Резонансные колебания возбуждаются электромеханическим преобразователем, присоединяемым в центральной точке широкой грани. Узкая грань, контактирующая со свариваемыми деталями, излучает высокочастотные ультразвуковые волны, обеспечивающие внутренний разогрев пластмассы, ее плавление и сварку.

При проектировании ультразвукового сварочного сонотрода необходимо определить варьируемые параметры, описывающие пространственную форму инструмента, при ограничениях на рабочую собственную и соседние "паразитные" частоты колебаний $\omega_{p} = \omega^{*} = const$; $\omega^{-} \leq \omega^{*} - \Delta \omega$; $\omega^{+} \geq \omega^{*} + \Delta \omega$.

Однако в силу возможности использования автоподстройки генератора наиболее эффективным является использование математической постановки, в которой рабочая частота не фиксируется жестко, а задается некоторый диапазон, в который она должна попадать $\omega_p \leq \omega^+ \perp \omega^+$; $\omega_p \geq \omega^- \perp \omega^+$.

Математическая модель сонотрода строилась с использованием восьмиузловых объемных КЭ. На рис.3 и рис.4 приведены поля коэффициентов чувствительностей собственных частот к добавлению материала на поверхностях сонотрода.



Рис. 3 - Четвертая собственная частота.

Рис. 4 - Пятая собственная частота.

В статье рассмотрены проблемы, возникающие при разработке на единой научно-методологической основе методов анализа чувствительности. Исследованы вычислительные этапы анализа чувствительности конечномерных и континуальных моделей конструкций, обладающих высоким уровнем адекватности реальным физико-механическим процессам различной природы. Рассмотрены прикладные задачи анализа чувствительности динамических характеристик для сложных составных конструкций к отклонению геометрических и физико-механических параметров на основе уточненных моделей.

Список литературы: 1. Piegl L.A. Ten challenges in computer-aided design. // Computer-aided design. -2005. - №37. - Р. 461-470. 2. http://www.cimdata.com/ 3. Грабченко А.І., Доброскок В.Л., Чернишов С.І. Система моделирования рабочих процессов интегрированных технологий. // Сучасні технологій у машинобудуванні: Збірник наукових статей – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. С. 236-268. 4. Кунву Ли. Основы САПР (САD/САМ/САЕ). – СПб.: Питер, 2004. - 560с. 5. Назаренко С.А Анализ чувствительности конструкций при воздействии физических полей различной природы // Вестник НТУ «ХПИ». 2006. № 32. С. 119-122. 6. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 7. Алехин В.И., Акимов О.В., Марченко А.П. Компьтерно-интегрирование моделирование литейных процессов в блоке цилиндров Daewoo Sens // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – Вып.2. – С.3-7.

В.Н. Некрасов, канд. техн. наук, В.Д. Гончаров, канд. техн. наук, В.И. Яковлев, канд. техн. наук, Барнаул, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Research on wear resistance of coverings from nanostructuring composite materials.

В современном быстро развивающемся мире к деталям машин, работающим в условиях скоростного трения, предъявляют высокие требования по качеству и способности сопротивляться изнашиванию, то есть сохранять первоначальные размеры и форму. Как правило, для этого на рабочие поверхности таких деталей наносят покрытия, обеспечивающие их износостойкость. От таких показателей как устойчивость покрытия к истиранию, отслаиванию от основного материала детали, воздействию высоких температур, а также его стоимость, будет зависеть его конкурентоспособность.

Разработке и исследованию износостойких покрытий посвящено большое количество работ [1,2,3]. В каждой из них указывается о необходимости увеличения ресурса детали, об эффективности использования износостойких и защитных покрытий, их составе, способах нанесения, но мало исследований описывающих структуру расположения составляющих элементов в покрытии. Связано это со сложностью технологического контроля и управления процессом ориентации зерен покрытия.

В лабораторных испытаниях на износостойкость исследовались два новых разработанных покрытия нанесенных путем детонационного напыления из наноструктурированных композиционных материалов: (TiC + NiCr) и (TiC + C_A + NiCr). Оба покрытия представляют собой нанозёрна карбида титана особым образом ориентированные в хромоникелевой матрице, во втором случае с добавлением ультрадисперсных кристаллов синтетического алмаза. Основное назначение покрытий, увеличение износостойкости рабочих поверхностей трущихся деталей.

Выбор оборудования осуществлялся согласно точностным и динамическим характеристикам удовлетворяющим всем необходимым условиям проведения эксперимента. В качестве испытательного оборудования использовалась машина трения модели 2168 УМТ, соединенная с компьютером. Для определения весового износа использовались аналитические весы АДВ – 200.

Исследования проводились с использованием специально изготовленных образцов представляющих собой пару «вал – втулка». Роль втулки исполняла колодка (рис. 1), роль вала – кольцо. Кольцо изготовлено из стали 40Х размером Ø40х42 мм, длина кольца была выбрана в 2 раза больше ширины колодки с целью сохранения постоянства технологических баз кольца без его переустановки при пробеге более 3000 м. Испытания велись в условиях сухого трения и на незакаленных образцах-кольцах для ускорения проведения экспериментов.

Для нанесения покрытий методом газотермического напыления, использовалась автоматизированная экспериментальный комплекс для детонационного нанесения покрытий на базе пушки модели «Катунь – М»[4]. Наноструктурированные компазиционные материалы были получены по спциальной технологии механоактивации порошков карбидов титана, ультадисперсных синтетических алмазов и порошков композиционного материала нкель-хром.



Рис. 1 – Конструкция колодки и кольца – a); схема испытания на износ δ)

.Покрытие толщиной 0,5 мм наносилось на колодку также изготовленную из стали 40Х. Размеры площадки контакта колодки равнялась 20х15 мм. На нерабочей поверхности колодка имеет паз для базирования в приспособлении машины трения. Перед нанесением покрытия колодка притиралась по кольцу до формирования пятна контакта по всей площади колодки ~ 98%, а после обрабатывалась пескоструйкой. Для снижения шероховатости поверхностей полученных напылением и достижения внутреннего диаметра равного диаметру кольца, выполнялась их предварительная алмазно-абразивная обработка до значения Ra = 1,25 мкм. В качестве сравнительного эталона была выбрана колодка без покрытия.

Параметры испытаний приведены в таблицах 1 и 2.
Таблица 1 – Удельное давление на колодке

р, МПа	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Р, Н	190	380	570	760	950

Таблица 2 - Скорость вращения кольца

V, м/с	0,2	0,5	1,0
n, об/мин	100	250	500

Для определения весового износа от длины пройденного пути использовались следующие режимы испытания:

- частота вращения диска n = 500 об/мин;

- нагрузка на колодку P = 760 H.

В таблице 3 представлены контрольные точки пройденого пути, в которых производились измерения.

Таблица 3 – Контрольные точки измерения весового износа

	L, м	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	
--	------	-----	-----	------	------	------	------	------	------	--

В ходе испытаний были получены следующие результаты. На рисунках 2; 3; 4 представлены зависимости весового износа от скорости трения, измеряемой в метрах в секунду, а также создаваемой на колодке нагрузки в ньютонах, износ граммах.



Рис. 2 – Весовой износ образцов при скорости трения 0,2 м/с.



Рис. 3 – Весовой износ образцов при скорости трения 0,5 м/с.



Рис. 4 – Весовой износ образцов при скорости трения 1 м/с

На рисунке 5 изображена зависимость весового износа от длины пройденного пути.



Рис. 5 – Весовой износ образцов в зависимости от длины пути при скорости трения 1 м/с, нагрузке 760 Н.

Выводы:

1. Анализ полученных данных показывает значительное снижение износа поверхностей полученных напылением износостойких материалов по отношению к поверхностям без напыления. Особенно заметна разница в 2 – 3 раза при низких скоростях скольжения (рисунок 2). А при скорости 0,2 м/с разница в износе достигает более 20 раз.

2. Износ покрытия в зависимости от длины пути характеризуется быстрым износом в начале пути трения и дальнейшей стабилизацией, что соответствует общей теории износа.

3. Разработанные композиционные материалы и технология нанесения покрытий можно рекомендовать использовать при ремонте и изготовлении пар трения двигателей внутреннего сгорания: поршневых колец, шеек коленчатых валов, втулок шатунов, кулачков, клапанов газораспределительного механизма и других деталей работающих в сложных условиях трения.

Список литературы: 1. Капунин Н.Г., Любинецкий Я.Г., Майданчик Б.И. Жизненный цикл и эффективность машин. – М.:Машиностроение, 1989. – 312с. 2. Сонин В.И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении. – М.:Машиностроение, 1973, - 216с. 3. Латыпов Р.А., Молчанов Б.А. Получение покрытий детонационным напылением // Сварочное производство. – 1995. - №9. – С.6–7. 4. Еськов А.В., Яковлев В.И. Автоматизированный экспериментальный комплекс исследования и контроля детонационного потока при напылении частиц // Известия томского политехнического университета. – 2007. - №2, том 311. – С.130–135.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

Е.К. Посвятенко, д-р техн. наук, Київ, Україна, Р.В. Будяк, Вінниця, Україна

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ СИНТЕЗУ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ГІДРОЦИЛІНДРІВ МАШИН

The technique of carrying out of experiments is described. Results of researches of processing of apertures of sleeves of hydrocylinders are resulted. The analysis of factory manufacturing techniques of hydrocylinders is carried out. Lacks of this technology are unsatisfactory accuracy and a roughness of a surface of sleeves. The basic directions of improvement of processing of sleeves are defined.

Стан питання, актуальність та мета дослідження. Комунальне машинобудування є однією з галузей української економіки, що інтенсивно розвивається. Важливою комунальною технікою є машини зі збирання та транспортування до місць утилізації твердих побутових відходів – сміттєвози, виробництвом яких в Україні займається ВАТ "АТЕКО" Турбівський машинобудівний завод [1,2]. У відповідності зі світовими тенденціями в українського споживача підвищеним попитом користуються сміттєвози із заднім завантаженням з контейнерів євростандарту. До групи цих сміттєвозів належать моделі КО 437 на шасі автомобілів МАЗ або КамАЗ та моделі

КО 432 на шасі автомобілів ЗІЛ, МАЗ, КамАЗ (табл.1). Переваги технології із заднім завантаженням комунальної машини полягають: у високому коефіцієнті ущільнення сміття; у виключені розсипання сміття при розвантаженні контейнера, оскільки ця операція здійснюється у приймальному бункері сміттєвоза; у безпеці оператора, тому що підйом контейнера здійснюється на висоту лише 1,5 м. У той же час і на сьогодні залишаються розповсюдженими вітчизняні сміттєвози з бічним механізованим завантаженням твердих побутових відходів із стандартних контейнерів за допомогою маніпулятора через люк в даху кузова. Популярність таких машин (моделі КО 415, КО 426 і КО 431) пояснюється в першу чергу їх низькою ціною. Багатофункціональний автомобіль моделі

КО 425 (табл.1, рис.1), так званий "мультиліфт", призначений для виконання різноманітних сезонних робіт у комунальному господарстві. На універсальних підйомниках автомобіля монтуються піскорозкидач, цистерна або бункери для збирання сміття.

		Maca	Maca	Об'єм кузова	Maca	
Модель	Базове шасі	машини	спецоблад	технологіч-ний,	завантаже-них	
		повна, кг	нання, кг	м ³	ΤΠΒ, κΓ	
КО 437-02	КамАЗ-43253	15200	5300	17±1,0	4100	
10 427 50	MA3-533702	16150	5200	17.10	5500	
KO 457-50	MA3-533701	16150	5300	1/±1,0	5500	
КО 432-01	MA3-437041	10100	3250	12±0,3	4100	
КО 432	ЗІЛ-432921	11200	3050	10±0,3	3900	
КО 433-1	ГАЗ-3307/3309	8000	1720	8,0	3510	
1/0 4264*	КамАЗ-43253	15200	3860	17±1,0	5740	
KU 4204*	MA3-533702	16150	3960	18±1,0	5890	
KO 415 A*	КамАЗ-53215	10500	4120	22.5	9370	
KU 413 A*	КамАЗ-53213	19300	4130	22,3	9370	
КО 431-02**	ЗІЛ-432921	11200	2260	13±0,5	5050	
VO 421 02**	MA3-437041	10100	2260	12+0.5	2200	
KO 451-05**	MA3-437030	11500	2200	15±0,5	5200	
КО 431-04**	КамАЗ-4308	11500	2260	13±0,5	3510	
	MA3-437041			закритого –	закритого –	
				10,0	3940	
КО 425-01		11000	1050	відкритого –	відкритого –	
				6,5	4300	
				цистерни-5,0	цистерни-4100	
КО 425 П	ГАЗ 3307/3309	8100	1250	5,0	2800	

Таблиця 1 – Зразки нової вітчизняної техніки комунального машинобудування

* вантажопідйомність маніпулятора - 500 кг

** вантажопідйомність маніпулятора - 650 кг



Рис. 1 – Багатофункціональний автомобіль – "мультиліфт", модель КО 425

В усіх моделях описаних вище комунальних машин комплекс технологічних операцій виконується за допомогою гідроприводу. При цьому надзвичайно важливою складовою останнього є маніпуляційні та силові гідроциліндри. Найбільш складними деталями останніх з позиції технологічності є гільзи, оскільки їх отвори належать до класу глибоких і повинні задовольняти наступним вимогам: точність за криволінійністю твірної – 0,1–0,15 мм/м, а по діаметру – Н7–Н9 при шорсткості опорної площі Ra 0,05–Ra 0,15. У базових технологічних процесах заготовками для гільз гідроциліндрів служать гарячекатані труби із доевтектоїдних вуглецевих конструкційних сталей марок 35 або 45 чи відповідних закордонних аналогів.

Відомі кілька варіантів побудови технологічних процесів обробки отворів гільз гідроциліндрів, які грунтуються на операціях чорнового та чистового розточування, розточування самоустановлювальними ножами, розкочування кульковим чи роликовим інструментом, обробці деформуючими та різальними протяжками [2–4 та ін.]. Однак, в усіх цих процесах не витримується зміна напрямку головного руху різання чи холодного пластичного деформування в сусідніх операціях на $\pi/2$. В результаті цього поверхні готових отворів набувають чітко вираженої хвилястості, коли фінішною операцією є розкочування, якій передує чистове розточування, або отримують на дзеркалі з шорсткістю Ra 0,16–0,32 кілька досить глибоких (до 1 мкм) поздовжніх рисок при фінішній обробці деформуючими протяжками. Все це призводить до недопустимих перетікань робочої рідини, оскільки в гідросистемах сучасних сільськогосподарських, дорожніх, будівельних, комунальних та ін. машин тиск сягає 15 МПа.

Виходячи із сказаного була визначена така *мета дослідження* – підвищення надійності гідроциліндрів машин технологічними методами, тобто за рахунок найбільш ефективного досягнення взаємодії сусідніх операцій між собою і поверхнею, що обробляється.

Методика і результати експериментальних досліджень. У гідросистемах сміттєвозів використовуються два типи гідроциліндрів: діаметром 80H8, Ra0,16, базова довжина 782 мм (8 або 12 шг. на машину) і діаметром 165H9, Ra0,16, базова довжина 1993 мм (1 шг. на машину) [2]. Перший типорозмір гідроциліндра служить для маніпуляції з контейнером, а другий – для пресування сміття безпосередньо в кузові машини. Кінцевим результатом досліджень було накопичення експериментальних даних для синтезу базових ресурсозберігаючих процесів механічної обробки обох типів гідроциліндрів, які забезпечували б, по-перше, комплексну економію ресурсів (зарплати, електроенергії, матеріалу заготовки, амортизаційних відрахувань, витрат на інструмент тощо) і, по-друге, – поліпшення експлуатаційних показників гідроциліндра і гідросистеми в цілому за рахунок цілеспрямованого впливу на наступні ключові характеристики інженерії поверхні гільзи: кривизну твірної, макро- і мікрорельєф опорної поверхні, деформаційне зміцнення поверхневого шару та металу основи, поле залишкових напружень, характер та інтенсивність текстури.

Проведенню основних серій лабораторних та виробничих досліджень передувало створення комплексної методики експериментів. Досліди по виявленню закономірностей механіки процесу різання було проведено на стендах, створених на базі горизонтально-протяжного, поперечно-стругального, вертикально-фрезерного та токарного універсального верстатів з використанням вимірювального модуля, що складався з трьохкомпонентного динамометра УДМ-600, підсилювача сигналів тензодатчиків ТОПАЗ 3-02 та шлейфового осцилографа Н 071.2. Зразки для досліджень було виготовлено із гарячекатаних сталей марок 35 і 45. Частину лабораторних досліджень та виробничі випробування було проведено на заготовках із стандартних гарячекатаних труб. Для всіх досліджуваних матеріалів було побудовано криві текучості. Інструменти для дослідів було виготовлено із сталей марок ШХ15 і Р6М5 (процеси розкочування і різання) та із спеченого твердого сплаву марки ВК15. Мастильно-охолоджувальне середовище створювалось за допомогою сульфофрезолу-Р. Швидкість протягування змінювалась в межах 0,02-0,2 м/с. Характеристики процесу різання було досліджено з використанням наступних методик: миттєвої зупинки та фіксації процесу з одержанням "кореня" стружки для вивчення контактних явищ та напружено-деформованого стану пружнопластичної зони; визначення допустимого ступеня заповнення стружкової канавки; поділу технологічних складових сили різання на сили на передній та задній поверхнях інструменту; експрес-методики визначення стійкості та ступеня спрацювання інструменту; графоаналітичної обробки текстурованих шарів металу та інших відомих і оригінальних методик. Для глибшого вивчення процесів ортогонального та неортогонального різання зі змінною шириною зрізування у дослідженнях застосовувались моделювання цих процесів струганням та точінням на призматичних та круглих зразках з попередньо нанесеними стружкоподільчими канавками. Геометричні та фізико-механічні властивості поверхні, а також поверхневого шару експериментальних зразків та деталей серійного виробництва досліджувались за допомогою відомих сертифікованих приладів та вимірювальних систем (мікротвердомірів, профілографів, кругломірів, оптичних та електронних мікроскопів, цифрових фото- та відеокамер тощо). Аналіз одержаних результатів проведено із застосуванням ПЕОМ та із залученням методів математичної статистики і планування дослідів.

Нижче наводиться частина результатів експериментів, які отримано в межах даного дослідження. Ці результати стосуються шорсткості і точності поверхонь гільз гідроциліндрів після основних операцій обробки отворів у відповідності з базовими процесами.

Відомо, що гарячекатані труби виготовляють за манесманівською технологією, суть якої полягає у прошиванні заготовки в нагрітому стані і подальшому прокатуванні до потрібних розмірів шляхом дії на зовнішню поверхню при вільній (без оправки) поверхні отвору. В результаті державний стандарт на сортамент таких труб регламентує лише розміри зовнішнього діаметра (точність $\pm 1\%$) і товщину стінки (точність $\pm 12,5\%$). Точність і якість поверхні отвору, його співвісність відносно зовнішньої поверхні є похідними від цих величин і стандартом не регламентується. Таким чином, технологія гарячекатаних труб призводить до можливої некруплості отворів порядку 3-5 мм, шорсткості їх поверхні Ra10-Ra20, окремих раковин на цій поверхні глибиною до 0,5 мм, відшарувань металу на таку ж глибину, а також втрати вуглецю у поверхневому шарі. Неспіввісність зовнішнього і внутрішнього діаметрів при цьому вимірюються міліметрами. Приклад такої трубної заготовки разом з профілограмою поверхні отвору наведено на рис.2а. Це зразок труби із сталі 35, що використовується у серійному заводському технологічному процесі на ВАТ "АТЕКО" Турбівський машинобудівний завод. Чорнове розточування, яке застосовується в цьому процесі, дозволяє позбутися практично усіх перелічених вище початкових дефектів поверхні отвору трубної заготовки (некруглості, неспіввісності, раковин, поверхневого шару з частково втраченим вуглецем, відшарувань, окалини). Проте, шорсткість поверхні при цьому може навіть дещо збільшуватись, оскільки залежить від подачі S на оберт деталі, яка визначає продуктивність обробки. На рис.26 показано фрагмент заготовки і профілограми поверхні після чорнового розточування: S = 1мм/об; Ra13,5; помітні зриви вершин мікронерівностей. Оскільки такий стан поверхні ще не придатний для фінішної обробки холодним пластичним деформуванням, в серійному технологічному процесі закладено операцію чистового розточування з подачею S = 0,6 мм/об (рис.2в), яка надає поверхні отвору наступні характеристики: Ra2,39; Ø 80H7; повна відсутність зривів вершин мікронерівностей. Ця операція є передостанньою, а фінішною – є розкочування деталей роликовим інструментом (рис.2г): Ra0,564 (при вимогах креслення Ra0,16); Ø 80Н8; значна хвилястість поверхні.



Рис.2 – Стан та профілограми поверхні заготовки гільзи: а – в стані поставки; б – після чорнового розточування; в – після чистового розточування; г – після розкочування.

Аналіз результатів проведеного дослідження дозволяє зробити наступні висновки і визначити напрямки подальших досліджень:

 традиційні процеси виготовлення гільз гідроциліндрів відзначаються низьким коефіцієнтом використання матеріалу заготовки і не достатньою якістю поверхні отвору гільзи за показниками шорсткості та точності;

– як перспективні для досліджень та виробничого застосування слід розглядати наступні два варіанти ресурсозберігаючих процесів обробки глибоких отворів гільз: чорнове розточування (зенкерування) заготовки із гарячекатаної труби – різальне протягування – фінішне розкочування; чорнове деформуюче протягування – чистове розточування – чистове деформуюче протягування.

Список літератури: 1. АТЕКО: Виробництво сміттєвозів та вакуумних автомобілів / Турбів Вінницької обл.: ВАТ "АТЕКО", 2008. – 14 с. 2. Посвятенко Е.К. Ресурсозберігальні процеси механічної обробки гідроциліндрів автомобілів сімейств ЗІЛ і КамАЗ для комунального господарства / Е.К.Посвятенко, Ю.Б.Паладійчук, Ю.М.Іванов // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. – К.: НТУ, 2000. – Вип.10. – С.89–97. 3. Розенберг О.А. Обработка отверстий гидроцилиндров протяжками / О.А.Розенберг, И.Т.Прокопов, Э.К.Посвятенко // Синтетические алмазы. – 1975. – Вып.3. – С.44–46. 4. Посвятенко Э.К. Обработка гидроцилиндров строительных и дорожных машин протягиванием / Э.К.Посвятенко, И.В.Лунгол, И.Н.Голобородый // Строительные и дорожные машины. – 1987. – №7. – С.8–9.

Поступила в редколлегию 26.06.2009

А. Г. Протасов, канд. техн. наук, Київ, Україна

ПРОБЛЕМИ ПРОФЕСІЙНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ У НАУКОВІЙ ЛІТЕРАТУРІ

Basic directions and approaches of development of engineering education are rotined, and also history and reasons of appearance of this direction is analysed in education. The renewed system of engineering education is most full answered by approach, which accents attention on the results of education, which go out outside the traditional system.

Постановка проблеми. У продовж останнього десятиліття спостерігається впровадження ідеї нової освітньої системи, особливою рисою якої є її спрямованість на формування у майбутніх фахівців не тільки знань, умінь та навичок, але й професійних компетентностей. Особливо це актуально для інженерної освіти, оскільки саме у галузі техніки і виробництва відбувається надшвидке оновлення інформації, знань, з'являються нові технології, зростає відповідальність фахівця за безпеку і надійність роботи обладнання. Тому на перший план висувається здатність студентів до постійного оновлення знань, творчого використання, самостійності у прийнятті рішень і відповідальності за їх наслідки. Незважаючи на те, що поняття «компетентність», «компетенція», «професійна компетентність» є широковживаним та дослідженим, сьогодні в освіті не існує однозначності у визначенні цих понять.

Термін «компетентність» не є новим і для України. Так, зокрема, у законі України «Про вищу освіту» якість вищої освіти визначається як «сукупність якостей особи з вищою освітою, що відображає її професійну компетентність…» [1]. Разом з тим, ці терміни залишаються достатньо новими і до кінця невизначеними, хоча вони часто зустрічаються на сторінках як наукових так і офіційних видань.

Аналіз актуальних досліджень та публікацій. Чотири основні стовпи, на яких повинна базуватися освіта XXI століття було означено у доповіді «Освіта: прихована скарбниця» головою міжнародної комісії ЮНЕСКО по освіті Ж. Делором. На його думку, якщо людина «навчиться пізнавати, навчиться робити, навчиться жити разом, навчиться жити», то вона придбає не тільки професійну кваліфікацію, але і компетентність, яка надаєть можливість вийти з великої кількості складних ситуацій та працювати у групі [2].

У працях зарубіжних науковців основна ідея компетентнісного підходу тлумачиться як підготовка нового покоління робітників, здатних адаптуватися до виробництва, що постійно змінюється і вдосконалюється. На думку західних експертів нова система освіти повинна сприяти підвищенню конкурентоспроможності робітників на ринку праці та скороченню безробіття за рахунок підготовки гнучкої та кваліфікованої робочої сили [3].

У 1997 році міжнародна комісія ЮНЕСКО зі справ освіти зазначає, що все частіше підприємцям потрібна не кваліфікація технічних працівників, яка на їх погляд асоціюється з умінням здійснювати ті чи інші операції матеріального характеру, а компетентність, яка розглядається як своєрідний набір навичок, в якому поєднуються кваліфікація у строгому розумінні цього слова, соціальна поведінка, здатність працювати в групі, ініціативність і прагнення ризику [2].

Таким чином, впровадження компетентнісного підходу в європейських країнах пов'язане із замовленням на освіту з боку працедавців, яким потрібні компетентні фахівці, та зумовлене спробою привести професійну освіту у відповідність до потреб ринку

Постановка завдання. Метою даної статті є спроба показати основні напрямки та підходи розвитку інженерної компетентнісної освіти, які представлені в науковій літературі, а також проаналізувати історію та причини появи цього напрямку у професійній освіті.

Виклад основного матеріалу. Проблемам модернізації системи професійної освіти на основі компетентнісного підходу присвячені роботи таких відомих науковців Західної Європи, як Д. Мартенс, А. Шелтон, Саймон Шо, Дж. Ревен та ін.

Ключові кваліфікації розрізняють залежно від професійної діяльності працівника. Так, А. Шелтон пропонує п'ять груп ключових кваліфікацій. Перша залежить від психофізичних якостей людини, це – здатність концентрувати увагу, швидкість реакції, координація руху та ін. Друга пов'язана з трудовою діяльністю, це – професійні вміння та навички. Третя відображує пізнавальні якості, такі як здатність до творчого мислення, креативність та ін. Четверта відбиває індивідуальні здібності – упевненість в собі, відповідальність, намагання досягти успіху в роботі тощо. П'ята віддзеркалює соціальні здібності людини, тобто вміння співпрацювати, комунікативність та корпоративність [3].

Фахівці країн Європейського Союзу також використовують такий термін, як «базові навички». У своїх роботах Саймон Шо базові навички поділяє на декілька груп. До групи «основних навичок» він відносить грамоту та вміння рахувати; до «життєвих навичок» – взаємини з іншими людьми, самокерування; «ключові навички» включають комунікативність та здатність вирішувати проблеми; «підприємницькі навички» – дослідження ділових можливостей; «управлінські навички» – аналітичне мислення; «соціальні і громадські навички» передбачають соціальну активність, моральні цінності [4].

У деяких країнах Європи (наприклад, у Великій Британії) поширений термін «ключові навички». Під цим терміном розуміють навички, що допомагають особистості розширити коло її професійної діяльності та покращити свою компетентність у сфері, яка виходить за межі професійної діяльності.

Питання про визначення ключових компетенцій для вищої освіти було поставлено у 1996 році в Берні на симпозіумі за програмою Ради Європи. У доповіді експерта В. Хутмахера «Ключові компетенції для Європи» було визначено п'ять основних груп ключових компетенцій, які мають важливе значення у підготовці молоді. До цих основних груп було віднесено: політичні, соціально-культурні, комунікативні, соціально-інформаційні, особистісні компетентності [6].

В роботі англійського вченого Дж. Ревена «Компетентність у сучасному суспільстві» компетентність розглядається як явище, що складається з багатьох, незалежних один від одного компонентів. Деякі з цих компонентів належать до когнітивної сфери, деякі – до емоційної, а деякі можуть заміняти один одного. Дж. Ревен пропонує 37 видів компетентностей [7, с. 281-296]. Таким чином, у західноєвропейських моделях компетентності акцент робиться на здатність фахівця самостійно здобувати нові знання, вміння, навички; знаходити шляхи вирішення комплексних завдань; вміння працювати в колективі.

Проблеми підготовки компетентного фахівця-інженера стала актуальною і для американського суспільства. Поняття «освітня компетентність» вперше було введено науковцями США ще у 80-х роках минулого століття, а пізніше робилися спроби визначити компетентність як певний освітній результат. На базі психолого-педагогічних досліджень, науковцями США (Дж. Каллаган, А. Кларк, Д. Кербі, Ш. Деррі, Д. Аллі) була розроблена модель «компетентного працівника», де акцент було зроблено на індивідуально-психологічні якості, зокрема – самостійність, дисциплінованість, комунікативність, потребу в саморозвитку [8].

Модернізації інженерної освіти в Росії присвячені роботи вчених Д. Пузанкова, І. Федорова, В. Петрова, та інших. Вони визначають компетентність, як сукупність знань у дії, тобто систему знань, яка орієнтована на практичне застосування. Ця система включає теоретичні, прикладні знання, а також емоційні та мотиваційні компоненти діяльнісних і процесуальних знань. Компетентним вважається фахівець, який здатний вирішувати складні нестандартні професійні задачі з використанням сучасних евристичних і креативних підходів та алгоритмів в умовах невизначеності або відсутності деяких даних. Тому, на їх думку компетентнісна модель інженера повинна включати в себе наступні компетентності: соціально-особистісні, економічні, загальнонаукові, інформаційні, політехнічні і спеціальні. Перші п'ять слугують основою майбутньої професії інженера, а спеціальні забезпечують тісний зв'язок з предметом праці [9].

Компетентності, які мають широке коло застосування пропонується називати «базовими компетентностями» і вони є багатофункціональними, надпредметними та міждисциплінарними. Загальнонаукові компетентності передбачають знання основних законів природи; соціальні – знання законів суспільства, громадянсько-правових норм, правил поведінки; економічні – основ законів економіки; інформаційні – знання основ інформаційно-комунікаційних технологій; політехнічні – знання основ техніки та принципів функціонування виробництва; спеціальні – знання у загально професійній галузі діяльності інженера.

В. Петров визначає три найбільш значимі функції діяльності випускника технічного навчального закладу, це організаційно-управлінська, інженерно-дослідницька та виховна. Організаційно-управлінська функція відображує адміністративно-управлінську діяльність випускника, яка характеризується компетентністю в галузі управління людським ресурсом, інженерно-дослідницька – у конструкторській і проектувальній сферах, а також у діяльності, що пов'язана з обслуговуванням технічних засобів, виховна відображує виховну діяльність фахівця зі своїми підлеглими. Виходячи з цього і необхідно формувати необхідні компетентності [10].

На відміну від компетентностей, компетенції – це здатність людини реалізовувати на практиці свою компетентність. Російський науковець С. Шишов визначає компетенцію як загальну здатність фахівця мобілізувати у професійній діяльності свої знання, вміння та способи виконання дій. На його думку ключові компетенції забезпечують універсальність фахівця, який реалізує свої компетентності тільки у діяльності [11].

Методологічні та теоретичні аспекти формування «професійної компетентності» були розглянуті у працях А. Маркової, Н. Кузьміної, Е. Зеєра, П. Шендерея, Ю. Варданяна та дисертаційних роботах С. Романова, І. Бичева та ін.

Сьогодні в Україні суттєво зростають вимоги до якості підготовки майбутніх фахівців. Тому, проблемі підготовки компетентних інженерів в Україні приділяють увагу багато вчених, серед них можна назвати Л.Л. Товажнянського, М.З. Згуровського, Ю.Ф. Зінковського, Є. Павлютенкова та ін. [12, 13].

Л. Л. Товажнянський наголошує, що перед освітньою системою України постала проблема невідкладного впровадження нової філософії інженерної освіти та розробки на її основі методології професійної підготовки студентів. Він пропонує модель професійної підготовки інженерів, яка враховує такі сьогоднішні реалії як: істотні зміни в характері та структурі професійної діяльності інженера; феномен прискореного старіння науково-технічних знань і технологій; необхідність професійної освіти протягом всього трудового життя та ін. [14].

У своїх роботах Є. Павлютенков досліджує проблему компетентності студента у процесі його професійного становлення. Він розглядає компетентність особистості як спроможність зрозуміти складну динаміку процесів розвитку та впливати на їх перебіг. На думку науковця, знання, уміння та здібності повинні забезпечувати діяльність людини не тільки в сфері матеріального виробництва, а й в культурній та духовній сферах. Таким чином, компетентність складається із знань про різні аспекти життя людини, навичок творчого володіння інтелектуальними і фізичними засобами та здібностями взаємодіяти з іншими людьми у різних ситуаціях [15].

Про необхідність реформування інженерної освіти свідчать і результати соціальних досліджень, які вказують, що рівень професійної компетентності, яка визначає конкурентоспроможність працівника в Україні становить 47,8%, а правової компетентності всього 11,5%. У той же час рівень цих видів компетентності у розвинутих країнах значно вище - 85,8% та 24,8% відповідно [16].

Висновки. Підсумовуючи, можна сказати, що вітчизняна система освіти, яка була спрямована на засвоєння системи знань і яка задовольняла індустріальне суспільство XX століття, перестала задовольняти потреби сучасного інформаційного суспільства, яке швидко змінюється та розвивається. Традиційна освіта забезпечувала випускників вищих навчальних закладів задовільним рівнем технічних знань, певними навичками та уміннями, але з розвитком інформаційних технологій, ці уміння та навички втратили своє попереднє значення. В той же час виробництво у XXI столітті потребує ініціативних і відповідальних фахівців, які б застосовували знання у процесі прийняття рішень і самостійно та ефективно вирішувати економічні та виробничі проблеми.

Сьогодні розвиток сучасного суспільства залежить від інтелектуального та духовного розвитку особистості. Людський фактор стає неодмінною умовою функціонування «нової економіки». Тому нова система освіти повинна бути орієнтована на підготовку висококваліфікованих громадян, які зможуть орієнтуватися в сучасному суспільстві, інформаційному просторі, будуть конкурентноздатними та мобільними.

Оновленій системі інженерної освіти найбільш повно відповідає компетентісний підхід, який акцентує увагу на результатах освіти, що виходять за межі традиційної системи. За умови його застосування результатом освіти стає не кількість засвоєної інформації, а здатність фахівця застосовувати її в різних проблемних ситуаціях і самостійно здобувати ту інформацію та знання, яких не вистачає. Тобто, наявність або відсутність необхідних компетентностей у фахівця після закінчення вищого технічного навчального закладу і є результатом навчання.

Проблеми подальших досліджень. При вивченні міжнародного досвіду країн де компетентнісна освіта запроваджена в життя виникає багато питань, які потребують уважного розгляду та дослідження. Наприклад, чи може бути випускник вищого технічного навчального закладу компетентним фахівцем, якщо він має тільки високий рівень знань, умінь і навичок? А якщо, компетентність передбачає «досвід самостійної діяльності на основі універсальних знань», то яким чином майбутній фахівець отримає цей досвід на студентській лаві? Як оцінити рівень компетентності випускника вищого технічного навчального закладу? На всі ці питання ще потрібно шукати відповіді,

тому подальше вивчення проблеми професійної компетентності інженерів є перспективним як для педагогічної науки, так і для практики інженерної освіти.

Список літератури: 1. Закон України "Про вищу освіту" від 17.01.2002 р. №2984-Ш. - Ст.1. 2. Делор Жак Образование – сокрытое сокровище. UNESCO, 1996 //Университетская книга. 1997. № 4. 3. Schelton A. Einfehrung in die Berufspedagogik – Stuttgart. 1991. – S.141. **4.** Roos T. G. Die Arbeitswelt im Jahre 2020: Was bedeutet sie für die biklung //Leicht geändert für Thurgauer Zeitung/ - 2002/ 18 Juni/ - S. 28-31. **5.** Овчарук О. Ключові компетентності: Європейське бачення. //Управління. **6.** Hutmacher W. Key Competencies for Europe //Report of the Symposium. Berne. Switzerlend 27-30 March, 1996. 7. Равен Дж. Компетентность в современном обществе. Выявление, развитие и реализация. М., 2002. (англ. 1984). 8. Каткова Т. Компетентний випускник – мета і результат діяльності вищого навчального закладу освіти. //Постметодика № 2-3 (40-41), 2002. с. 79-82. 9. Пузанков Д., Федоров И., Шадриков В. Двухступенчатая система подготовки специалистов. // Высшее образование в России. – 2004. – № 2. – C. 3 – 11.

10. Петров В. А. Эталонное моделирование в системе профессиональной подготовки нженерно-технических кадров. //Инновации в образовании. – 2001. – № 4. – С. 64 - 71. 11. Шишов С. Понятие компетенции в контексте качества образования //Стандарты и мониторинг в образовании. – 1999. – № 2. **12.** Згуровский М. З. Болонський процес: шляхом європейської інтеграції. Інтерв'ю. Дзеркало тижня. - № 40. – 18.10.2003. – С.17. **13.** Зінковский Ю.Ф. перспективи та можливості неперервної освіти // Неперервна професійна освіта: теорія і практика. У двох частинах. – Ч. 1. – К., 2001. – С. 23-27. 14. *Товажиянский Л. Л.* Формувания гуманітарно-технічної еліти як перспективна парадітма. В добучаницах. – 1. 1. – К. 2001. – С. процесу. //теорія і практика управління соціальними системами. – 2004. – № 1. – С. 3 – 9. 15. *Павлютенков Є*. Професійне становлення педагога. // процесу. // торы г практика управлиня соцальними системами. – 2004. – № 1. – С. 3 – 9. 15. Главнотелков С. процесине становления педагоги по професійне становления педагоги и к працівників. /Наук. ред. С. М. Павлютенков, В. М. Сисоев. – Запоржжя. ЗОІУВ. 1997. – С. 3-8. 16. Носков В., Кальянов А., Сфросиніна О. Компетентність як складова підготовки фахівців у гумангарному вищому навчальному закладі. //Соціальна психологія. № 5. 2006. – C. 110-121.

Поступила в редколлегию 26.06.2009

В.И. Ролдугин, д-р экон. наук, Рига, Латвия

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КРЕДИТОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

The purpose of given article is search of the latent reserves in sphere of bank experts preparation and their uses for increase of efficiency of crediting of the enterprises and associations of mechanical engineering. In article the questions connected c by preparation of bank workers, with use of new approaches and modern technologies are considered. Methods offered by the author can be used for development of remote training the Baltic international academy in Ukraine.

Метою даної статті є пошук прихованих резервів у сфері підготовки банківських фахівців і їхнього використання для підвищення ефективності кредитування підприємств і об'єднань машинобудування. У статті розглянуті питання, зв'язані с підготовкою банківських працівників, з використанням нових підходів і сучасних технологій. Пропоновані автором методи можуть бути використані для розвитку дистанційного навчання Балтійської міжнародної академії в Україні.

Для успешного развития коммерческого банка, укрепления его позиций на рынке банковских услуг и повышения конкурентоспособности необходимо осуществлять деятельность по обучению и повышению квалификации сотрудников. Кредитным учреждениям приходится адаптироваться к изменениям внешней среды, что требует внесения своевременных корректив своей деятельности и обеспечения рабочих мест квалифицированными специалистами.

Балтийская международная академия принимает активное участие в дистанционном обучении среди украинских учебных заведений. В странах Балтии востребованность заочного образования традиционно велика, но его распространение сдерживается отсутствием русскоязычного образовательного контента. Партнеры академии в Украине могут способствовать адаптации предлагаемых дисциплин к особенностям своего образовательного рынка и профессиональных аудиторий.

Возможности современных технологий позволяют разрабатывать специальные теоретические подходы к применению современных методов представления знаний и передачи информации в условиях интернационализации банковского бизнеса. Наш опыт показывает, что дистанционная подготовка банковских специалистов может быть развернута на базе новых технологий, которые направлены на реализацию конкретных моделей обучения.

Дистанционное обучение должно быть ориентировано на будущую профессиональную деятельность, на применимость знаний и навыков для принятия управленческих решений. Основное преимущество дистанционного обучения заключается в возможности его проведения в любое время и в любом месте, ориентируясь на латвийский и украинский образовательные рынки.

Реализация модели дистанционного обучения на различных образовательных уровнях возможна при условии комплексного подхода, т.е. методологического, прикладного, регионального и психологического аспектов. Рассмотрим важность использования каждого из них.

Так, методологический аспект связан с разработкой программы обучения, основных принципов организационных форм, , критериев оценки, форм самостоятельной работы обучающихся, а также с системой контроля и коррекции деятельности обучающихся преподавателем.

Прикладной аспект ориентирует процесс обучения на профессиональную деятельность, на приоретение навыков, на совершенствование методики дополнительными информационными ресурсами. Не менее важет региональный аспект, который определяет возможность использования данный модели для подготовки специалистов за границей с учетом местных и национальных особенностей.

Психологический аспект связан с изучением процессов и закономерностей обучающей деятельности педагогов и учебной работы обучающихся в условиях дистанционного обучения, построенной с учетом потребностей, интересов, направленности, мотивов, уровней обученности и т.д.

Применение комплексного подхода позволяет обеспечить взаимосвязь различных аспектов при разработке реальной модели системы обучения, а на уровне концептуального положения – предусмотреть возможности дальнейшего развития дистанционного обучения вуза, совершенствования составных компонентов на основе определения их связей и зависимостей, установления степеней влияния и значимости.

Важным фактором эффективности дистанционного обучения является корректировка учебных программ по экономическим дисциплиным, которые должны быть ориентированы на спрос со стороны действующих кредитных и финансовых учреждений. Например, на такие дисциплины, как: кредитование промышленных предприятий, кредитный менеджмент, международные расчеты за товарно-материальные ценности и услуги.

Так, обучение по программе кредитования объединений и предприятий машиностроения предполагает: во-первых, изучение студентом порядка и методов кредитования, во-вторых, разъяснение преподавателем операций по оформлению и выдаче ссуд промышленным предприятиям, в-третьих, организацию контроля степени усвоения изложенного материала, в-четвертых, выполнение студентом отдельных операций по кредитованию инновационных мероприятий под контролем преподавателя и комментарии последнего.

При изучении порядка и методов кредитования следует акцентировать внимание на то, что в банковской практике используются два метода кредитования: остаточный и оборотно-сальдовый. Выбор более приемлемого метода для кредитования оборотных средств связан с их кругооборотом: наличность > кредиторская задолженность > производственные запасы > незавершенное производство > готовая продукция > реализация > дебиторская задолженность > наличность > наличность > кредиторская задолженность > наличность >

В отличие от сезонного кредитования, обязательства по возврату ссуд погашаются после одного цикла воспроизводства. У нормально работающего предприятия отдельные кругообороты фондов как бы постоянно перекрывают друг друга. Проблемы при кредитовании заключаются в своеобразном параллельном движении производственных фондов (в натуральном выражении) и их стоимостном выражении. Стоимостное выражение активов промышленного предприятия является объектом кредитования. Движение активов происходит неравномерно и не совпадает во времени, что нередко приводит к значительным колебаниям обеспечения кредита от заранее планируемых сумм.

Поэтому, прежде чем заключить кредитный контракт, должен делаться тщательный кредитный анализ заемщика. Кредитный работник должен тщательно анализировать заемщика, определять риски и отражать их в докладе,

обсуждаемом на кредитном комитете банка.

Доклад об условиях кредитования предприятия, обсуждаемый на кредитном комитете, должен содержать предложения о:

1) выводы о надежности клиента и доходности его операций;

2) лимитах кредитования;

3) сроках кредитования и расписании платежей;

4) величине процентной ставки (дисконте);

- 5) структуре обеспечения кредита, принимаемого банком в залог, а также аргументах, подтверждающих возможность погашения кредита в предлагаемые сроки;
- 6) информации, которую необходимо получать от заемщика, и определении условий, при которых кредит должен быть возвращен досрочно;
- 7) плане действий на случай возникновения у клиента финансовых затруднений.
- Для этого кредитному работнику необходимо дать ответы на следующие вопросы:
- 1) Каков набор производимых продуктов и рисков, связанных с их реализацией?
- 2) Какие характеристики сырья и надежны ли сроки его поставки?

3) В чем особенность технологического процесса кредитуемого предприятия и насколько эластичен спрос на производимую им продукцию?

- 4) Насколько конкурентоспособна отрасль машиностроения, в которой работает предприятие?
- 5) Учитываются ли экологические вопросы в процессе производства и реализации продукции?
- 6) Каково качество менеджмента на данном предприятии? При оценке качества менеджмента, важен возраст руководителей и предыдущий опыт работы. Как работали предприятия, которыми они руководили ранее? Компетентны ли руководители в научной сфере, связанной с их практической деятельностью? Какой долей капитала они владеют в уставном фонде предприятия? Но наиболее важна их честность и порядочность.

В результате обучения по данной программе студенты должны овладеть знаниями и навыками в области кредитования промышленности. В процессе обучения они должны выполнить практическое задание с подготовкой и рассмотрением документов для кредитования предприятия. Такое задание должно включать: рассмотрение заявки на кредит, интервью с заемщиком, подготовку перечня документов для предприятия о возможности выдачи кредита, исходя из доходов, получение информации о заемщике и его поручителях, изложение условий кредитования, а также оформление кредитного договора и принципы мониторинга предоставленного кредита.

Специалисты кредитного отдела должны обеспечивать контролируемость заемщика. Кредитемое предприятие контролируемо, если при оформлении кредита обеспечены следующие условия:

1) никакая другая компания не должна иметь первоочередного права требования заложенного имущества, если такое право не оформлено на день выдачи кредита;

- 2) необходимо правильно определить стоимость залога и установить правильное соотношения между выданным кредитом к имеющемуся у заемщика залогу;
- 3) должен быть обеспечен контроль за состоянием и движением заложенного имущества: знание в любой момент реальной стоимости залога и его местонахождения. Наблюдение за использованием кредита необходимо для того, чтобы выявить на ранней стадии нецелевое использование кредита. Для этого работниками банка проводятся проверки по данным бухгалтерского и складского учета.

В процессе обучения должны использоваться деловые игры. Использование специальных компьютерных программ позволяет обучить основным навыкам, необходимым кредитным работникам. В процессе обучения особое внимание следует уделить особенностям кредитования промышленных предприятия в условиях финансового кризиса. Будущие кредитные работники должны реально представлять свои действия после возникновения признаков проблемного кредита.

После предоставления кредита банк тщательно ведет контроль за его использованием. Если появляются первые признаки проблемности кредита финансового или нефинансового характера, кредитные работники:

консультируются с работниками отдела, который занимается проблемными кредитами (если таковой имеется);
 подготавливают справку руководству, в которой отражают необходимость перевести кредит в более низкую квалификацию;

- 3) изучают возможность получения дополнительного обеспечения;
- 4) разрабатывают план корректирующих мер;

5) следят за операциями на расчетном счете заемщика.

Если таковой счет ведется банком-кредитором, это может помочь контролю и прояснить, каким образом предприятие тратит средства. Изучение движения средств по основному счету может подсказать момент необходимости применения санкций к заемщику. Сигналом для этого может послужить перевод поставщиками предприятия на расчеты только на условиях предварительной оплаты.

После возникновения у предприятия серьезных финансовых проблем, кредитный работник:

1) изучает документы, сопровождающие течение конфликта;

2) проверяет не пропущен ли установленный законом срок подачи претензии и иска;

3) пролонгирует кредит в качестве краткосрочной стратегии;

4) требует от заемщика план-стратегию выхода из кризиса (по сокращению расходов и увеличению доходов);

- 5) проверяет каково качество документации по залогу;
- 6) анализирует имеет ли он право претензий против третьей стороны (например, гаранта);
- 7) ищет возможность разрыва отношений с заемщиком;
- 8) пытается продать ссуду со скидкой и выйти из дела;
- 9) передает обслуживание кредита по контракту другим финансовым учреждениям;

10) совместно с руководством компании выявляет проблемы и пытается их решить.

Построение реально действующей системы дистанционного образования должно включать активное применение телекоммуникационных сетей различного уровня, а также проводить обучение в нескольких режимах: в виртуальных аудиториях, интерактивное обучение под руководством преподавателя, организацию практических занятий и сдачу

экзаменов через Интернет.

Преподаватель может загрузить учебные виртуальные материалы с помощью Web-браузера, а затем общаться со студентами посредством аудиосвязи, в чате или через электронную почту. Обновление материалов учебного курса должно происходить в режиме реального времени, а в случае необходимости могут проводиться видеоконференции. Оценка знаний студента осуществляется путем экзаменационного тестирования.

Несмотря на то, что дистанционное обучение является перспективным направлением профессионального образования, его внедрению в банковской сфере препятствует ряд организационных проблем. Основные из них связаны с разработкой учебных программ и требуемого времени для ее усвоения.

Применение технологий дистанционного обучения требует немалых расходов, в частности: приобретение видео и аудио аппраратуры; привлечение к учебному процессу высококвалифицированных специалистов, владеющих инновационными технологиями банковского менеджмента. Поэтому только применение комплексного подхода позволяет обеспечить эффективность и взаимосвязь различных компонентов при разработке системы дистанционного обучения, а также определить потенциальные возможности развития дистанционного обучения вуза.

Конкретные вопросы организации дистанционного обучения должны решаться в центрах дистанционного обучения, которые следует создавать в образовательных структурах, имеющих достаточное финансирование. Балтийская международная академия обладает финансовыми ресурсами в рамках европейских общеобразовательных фондов (ERASMUS, TEMPUS и др.).

Практика дистанционного обучения убеждает в том, что целесообразно создавать центры в вузах, так как упомянутые выше проблемы могут быть решены лишь в тесном взаимодействии между специалистами в банковском деле и преподавателями, занимающимися вопросами методологии педагогического процесса.

Список литературы: 1. Дистанционное обучение: Учебное пособие / Под ред. Е.С. Полат. - М.: Гуманит. изд. центр "Владос", 1998. 2. Монахов В.М. Технологические основы проектирования и конструирования учебного процесса.-Волгоград: Перемена, 1995. 3. Скибицкий Э.Г. Дидактическое обеспечение процесса дистанционного обучения. Дистанционное образование №1, 2000. 4. Шабанов. А.Г. Моделирование процесса дистанционного обучения в системе непрерывного образования: автореф. дисс. д.п.н. / А.Г. Шабанов. – Барнаул, 2004.

Поступила в редколлегию 27.06.2009

сопрягаю

С. Е. Сазонов, С. М. Братан, д-р техн. наук, Севастополь, Украина

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ДОВОДКИ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ НА ПАРАМЕТРЫ ТОНКОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

In the article the results of x-ray photography researches are rotined as evaluated by distortions of crystalline grate of beryllium bronze after polishing diamond pastes





Рис. 2 – Схема экспериментальной установки
 а) – общий вид установки; б) – приспособление для установки и закрепления маятника.

Исследование влияния режимов процесса доводки на параметры тонкой кристаллической структуры (ТКС) выполняли на дифрактометре «Дрон-2» в Fek излучении рентгеноструктурным методом (рисунок 3). [6, 8].



Текстуру изучали методом наклона (методом Шульца). Съёмку производили в железном неотфильтрованном излучении при напряжении 25 кВ и токе трубки 5 мА. Информация, получаемая при исследовании, определялась путем регистрации рентгеновского излучения с последующим анализом профиля рентгеновской линии. Рентгенографирование образцов

производили при скорости движения счетчика автоматической регистрации интенсивности излучения с последующия аналном профлія рентсибоской линии. Тентевографирование ооразцов производили при скорости движения счетчика автоматической регистрации интенсивности излучения 1/2 град/мини второго порядка, отражения регистрации линий производили по точкам. Для исследования TKC ренттенографировали линии 111, 220, 311. Характеристики TKC (размеры блоков, микроискажения) изучали рентенографическим методом аппроксимации [6, 9]. Для выделения физического уширения при исследовании TKC исключали из общего уширения долю уширения, связанную с условиями съемки. Это осуществлялось с помощью стандартного образца (эталона), для которого ширина линий определялась только только и образцов. Тапона производили в то каке геометрических условиях, что и для исследуемых образиов. Такой эталона был изготовлен из материала с крупными блоками (размеры блоков превышали 1500 A), в котором отсутствовали микроискажения. Эталон был получен при отжите исследуемых материалов до температуры начала рекристаллизации с последующим охлаждением. При этом линии ^{са}1 и ^{са}1 эталона полностью разделялись на линии с большими углами. Качество эталона проверяли съемкой в расходящемся пучке рентгеновских лучей. На рентгенограммах были видны мелкие, равномерно распределенные линии без фона между ними. Далее рентгенографировали линии h, k, l, ucследуемых образцов, изготовленных доводкой свободным абразивом из холоднотянутой ленты на следующих режимах:

– окружная скорость притира [№] =0,33 м/с;

– величина усилия прижима на притир $P_{r} = 0,2\div0,8$ кг/см²;

– движение подачи притира в продольном направлении S_x=1,6·10⁻³ м/с.

В настоящей работе разделение дублета рентгеновских линий на ⁶²1 и ⁶²1 пороводили методом Решингера [5]. Ширину исследуемых линий образцов и эталона определяли по формулам:

$$B = \int_{0}^{10} \frac{h(2\vec{P}_{g})d(2\vec{P}_{g})}{h(0)}$$

$$b = \int_{0}^{10} \frac{g(2\vec{P}_{g})d(2\vec{P}_{g})}{g(0)}$$

где B – истинная ширина линий образца, зависящая от состояния структуры и условий съемки с учетом поправки на α_1 и α_2 дублет; b – геометрическое уширение (линии эталона); h(2V) и g(2V) – интенсивность линий исследуемых образцов и эталона; h(0) и g(0) – максимальная интенсивность линии эталона и образца; V_k – бреговские углы отражения от плоскости; $2V_1$, $2V_2$, h_k , k_k , l_k – углы, при которых рентгеновская линия сливается с фоном. С учетом поправки на инструментальное уширение определили физическое уширение:

$$\beta = \int_{0}^{\infty} \frac{f(2\overline{\nu})d(2\overline{\nu})}{f(c)}$$

_{где} f(2V) f(2P) – распределение интенсивности рентгеновских линий с учетом инструментального уширения. Общее уширение вычисляли как среднее геометрическое физических уширений при аппроксимации функциями Коши и Гаусса:

$$\beta = \sqrt{(B-b)\sqrt{B^2-b^2}}$$

дифрагированных лучей. Известно, что интенсивность излучения, которая регистрируется счетчиком, определяется скорость ета импульсов.

ростью сч
$$n = \frac{N}{T}$$

где N – число импульсов, зарегистрированных отметчиком за определенное время T. Вероятность попадания кванта рентгеновского излучения распределена во времени равномерно (при неподвижном счетчике и высокой стабильности работы всех электрических схем) определяется распределением Пуассона.

Абсолютная оу и относительная ву погрешности, обуславливаемые статической природой потока квантов, определяются соответственно следующими выражениями:



Расчеты величин этих погрешностей методом измерения времени накопления постоянного числа импульсов приведены в таблице 1. Таблица 1 - Значения погрешностей при постоянном числе импули

COB.	_			
	№, имп	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
	<i>^σи</i> ,имп/с	10 ²	3,2×10 ²	10 ³
	Ev 0/2	2	0.32	0.10

При измерении интенсивности дифрагированного излучения 🏞 в присутствии фона 🏞 и времени Т измерения интенсивности линии 🕫 и фона получим:



Величина относительной погрешности измерения интенсивности линий при различных значениях К приведена в таблице 2 Таблица 2 - Относительная погрешность измерения интенсивности рентгено

1	n, c ⁻¹	1000	1000	1000	600
	T, c	100	100	100	1000
	ⁿ ø, c ⁻¹	50	500	200	200
	no. c-1	950	500	200	200
	K ,	0,05	1	2	2
	E %	0.34	0.77	1.6	0.5

Видно, что точность измерения возрастает при увеличении времени измерения, уменьшении интенсивности фона и увеличении интенсивности рентгеновского рефлекса. При проведении исследований время подбиралось таким образом, чтобы относительная погрешность измерений не превышала 0,5-0,1%. Если интенсивность определяется интенсиметром с записью дифракционной линии на самописце, то максимальная относительная погрешность измерения скорости счета может быть найдена по формуле:

$$t_{max} = \frac{1}{2} H \cdot R \cdot C$$

Для 1100⁻⁴с и 12=1000⁻¹ с при RC =2 с максимальная погрешность равна соответственно 5% и 1,6%, а при м=2000⁻¹с, RC =2 с - 1,1%. Рассчитаем потери счета из-за конечной величины мертвого времени счетчиков. Известно, что мертвое время гейгеровского счетчика равно примерно 200 мкс (150-200), для приборов типа СРС-1мкс. Если 🐂 – измеренная счетчиком скорость счета импульсов, то не будет сосчитано 🎚 🦥 👘 💈 импульсов и, таким образом, реальная скорость счета импульсов равна:

$$\eta = \eta_{mn} + \eta \cdot \eta_{mn} \cdot \epsilon$$

 $\eta = \eta_{mn} / (1 - \eta_{mn} \cdot \epsilon)$

Тогда относительная погрешность при измерении может быть вычислена по формуле:

$$R_{g} = \frac{H - H_{max}}{m} - H_{max} \cdot 1$$

При измерении скорости счета 100 и 1000 имп/с для счетчиков МСТР-4 и СРС вычисленные значения поправки [№], относительной погрешности измерений без поправок [©]е и относительной погрешности величины [©] представлены в таблице 3. Таблица 3 – Погрешности скорости счета с учетом мертвого времени счетчика

Тип счетчика	MC	TP-4	C	PC
Мертвое время, с	2×1	10-4	1	0 ⁻⁶
²⁷ man, c ⁻¹	100	1000	100	1000
n, c ⁻¹	102	1250	100	1001
Er,%	2	20	0,01	0,1
E,%	0,02	3,1	5×10 ⁻⁷	5×10 ⁻⁷

Для счетчиков дифрактометра Дрон-2 ошибка в потере счета при интенсивности, меньшей 10⁴ имп/с, не превышает 1%. Величина направленного дифракционного максимума и с учетом фона и и измеряемого максимума " может быть найдена по формуле:

$$n = n_{\mu} / (1 - r_{\mu\nu}) - n_{\mu} / (1 - r_{\mu\mu})$$

Для дифрактометра Дрон-2 скорость счета без учета мертвого времени равна 900 имп/с, а с учетом - 901 имп/с, при относительной погрешности измерения интенсивности без учета мертвого времени - 0,11%. Поэтому при измерении интенсивности линий на дифрактометре Дрон-2 учет мертвого времени не производился. Для повышения точности измерений параметров TKC при измерении интенсивности размытых дифракционных линий в проведенных исследованиях вводилась поправка на угловой множитель *PLG* (угловой множитель равен произведению кинематического, поляризационного и геометрического множителей). Профиль рентгеновской линии пересчитывали в истинный делением ординат (высот над фоном) на соответствующий множитель.

$$FLG = \frac{1 + \cos^2 F}{\cos^2 F \cdot \sin^2 F}$$

Исправленные значения интенсивности позволили более точно определить интегральную интенсивность уширения и параметры ТКС. Анализ работ [5, 6, 11] показывает, что суммарная ошибка измерения интенсивности, обусловленная нестабильностью источника излучения и детектора, дрейфом этих устройств, потерями счета, составляет величину, меньшую 2%. Следует учесть, что уширение ушфракционной линии связано также с несовершенством геометрии съемки. Причиной этого искажения являются:

характерный профиль рентгеновского излучения;

характерный профиль рентгеновского излучения;
 дефокусировка луча вследствие вертикальной и горизонтальной расходимости пучка;
 проинкновение излучение излучения в глубь образиа.
 Конечная шврина счетчика приводит к симметричному размытию дифракционного излучения.
 Уменьшение инструментального уширения производили точной юстировкой гониометра и выбором оптимальных отношений геометрии съемки. Учет инструментального уширения вводили съемки соответствующего эталона.
 В ходе работ было проведено определение случайной погрешности ТКС. Расчеты показали, что величина случайной погрешности при определении микроискажений не превышает 10%. Этот результат согласуется с данными работ [7, 10, 12], в которых показано на основе многократной съемки одного и того же образца, что величина относительной погрешности составляет соответствующиется с точное поставляет соответствующи понседение поставляет соответствующи с точной погрешности КС. Расчеты показали, что величина случайной погрешности при определении микроискажений не превышает 10%. Этот результат составсуется с данными работ [7, 10, 12], в которых показано на основе многократной съемки одного и того же образца, что величина относительной погрешности составляет соответственно 5 и 15%.

11750. Таким образом, можно утверждать, что в проведенных исследованиях суммарная погрешность измерения не превышала 10% – 15%. В результате эксперимента наблюдался процесс незначительного упрочнения перемычки маятника на небольшую глубину, что было подтверждено рентгеноструктурным анализом. Результаты ентгеновских исследований (таблица 4) показывают, что в процессе доводки свободным абразивом при определенном сочетании технологических режимов могут быть получены поверхности с ентаклепанным поверхностным слоем.

Denu Таблина А

аблица ч – гезультаты рентеновеких исследовании								
Образец	Режим обработки		Уширение линии, мм		ческое рение, рад	Микро- искаже-ния	Плотность дислокаций	Размер блоков Д
<u>DN5</u>	Р _{я,} кг/см ²	111 α	311 a	111 α	311 α	$\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-3}$, см ⁻²	Ă
1	Эталон	22	82					
2	Прокат (исх.пов.)	35	108	0,45	1,17	1,87	10-10	319,3
3	0,2	26	96	0,23	0,83	1,74	2,0.10-11	1867
4	0,4	27	97	0,26	0,86	1,75	3,7.10-11	1356
5	0,6	29	99	0,35	0,93	1,77	5,2.10-11	814
6	0,8	34	102	0,43	1,1	1,80	9,2.10-11	336

Сравнивая ширину (рисунок 4) рентгеновских образцов, обработанных алмазными пастами с линиями образца, полученного электрохимическим полированием, можно констатировать, что процесс доводки свободным абразивом (при данных условиях обработки) не вносит существенных дополнительных напряжений в исходную структуру обрабатываемых поверхностей.



Рис. 4 – Плотность дислокаций в поверхностном слое детали из бериллиевой бронзы

БрБ2 после доводки алмазными пастами с зернистостью 60/40-1/0. 1 – Прокат в состоянии поставки; 2 – $F_{p} = 0, 3$ кг/см²; 3 – $F_{p} = 0, 4$ кг/см²;

4 –
$$\mathbb{P}_{\mathbb{P}} = \mathbb{D}_{\mathfrak{n}} \mathfrak{l}_{\mathrm{KF/CM}^2}$$
; 5 – $\mathbb{P}_{\mathbb{P}} = \mathbb{D}_{\mathfrak{n}} \mathbb{I}_{\mathrm{KF/CM}^2}$
іводы:

Вь

Исследование тонкой кристаллической структуры образцов из бериллиевой бронзы БрБ2 после доводки свободным абразивом позволяет сделать вывод о существенном влиянии усилия прижима Р, действующего в радиальном направлении, на характер пластической деформации. Установлено что при обработке с усилиями Р, лежащими в диапазоне 0,2+0,5 кг/см² обеспечивает глубину

дефектного слоя (с микроискажениями кристаллической решетки) порядка 2 мкм. С увеличением усилия прижима Руувеличивается ширина дифракционных линий, плотность дислокации и микроискажения кристаллической решетки. Таким образом, управляя технологическими режимами, можно влизить на степень и глубину наклепа при доводке маятников. Помимо исследования параметров искажения кристаллической решетки следует провести испытания обработанных изделий на долговечность, что представляет собой перспективы дальнейших

разработок в данном направлении.

Синсок литературы: 1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977, —390 с.; **2.** Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания/ В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977, —390 с.; **3.** Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке/ Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979, —232 с.; **4.** Братан. С.М. Технологічні основи забезпеченняя квості і підвищения стабівьності високопродуктивного чистового тонкого шийравника автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук. спец. 65.02.08 «Технологія машинобудванняя» С.М. Братан. – Одеса, 2006.—35 с.; **5.** Баракин В.В., Олейникова Т.М. Исследование потокої вистового тонкого шийравника автореф. дис. на здобутости у наук. ступеня докт. техн. наук. спец. 65.02.08 «Технологія машинобудванняя» С.М. Братан. – Одеса, 2006.—35 с.; **5.** Баракин В.В., Олейникова Т.М. Исследование потокої вистротови тонкої висорозова и коррозовонов и коррозовонов и коррозования в коррозования кола и техропонитического констроитического местова у версования в коррозования в коррозования ступкатическах структура. Цабта выкода значетропов и коррозованов и коррозование силокати участви савеля. "Защити маталлов, 1979, № 6, с. 708–710.; 6. Баракин В.В., Королёв В.И. Тонкая кристаллическая структура и и контроль источников тока, – часто с. 4. Подураев. В.И. Королёв В.И. Тонкая кристаллическая структура и и контроль источников тока, – часто с. M., 1975, c. 63-64.;

М., 1975, с. 63-64.; 7. Линое Л. Ронттенография кристаллов: Теория и практика // Пер. с франц. – М.: Физматиги, 1961, 604 с.; 8. Горелик С.С., Расторлуев Л.Н. Ренттенографический и электронно-оптический анализ. – М.: Металлургия, 1970, 218 с.; 9. Кривоглаг М.А., Рябошанка К.П. Рассевине ренттеновских лучей кристаллами, состоящими из блоков и содержащими дислокации // Вопросы физики металлов и металловедение: – К.: Труды института металлофизики АН УССР, 1963, с.25–31.; 10. Кривоглаг М.А., Рябошанка К.П. Рассевине ренттеновских лучей кристаллами, состоящими из блоков и содержащими дислокации // Вопросы физики металлов и металловедение: – К.: Труды института металлофизики АН УССР, 1963, с.25–31.; 10. Кривоглаг М.А., Ринотография и электронная микроскопия. // Уманскай Л.С., Скатоков О.А., Пошею А.И. и ор. – М.: Металлургия, 1982, 632 с.; 11. Лаборатория металлография // Пачченов Е.В., Саково В.И. и ор. – М.: металургия, 1965, 245 с.; 12. Лысак Л.Н. Определение упругих искажений и размеров дисперсионных блоков. // Физические основы прочности и пластичности металлов. – М.: Гос. научи.-техи. из-во по черной и цветной металлургии, 1963, с. 153–171.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

А.А. Симонова, В.А. Фадеев, д-р техн. наук, Н.В. Верезуб, д-р техн. наук, Д.Н. Головко, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКЕ ИЗ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА

A model for temperature field distribution in multi time turning into the workpiece of the sub micro crystalline titanium is considered. Same special experimental and theoretical techniques were developed for model parameters estimation using laboratory experiments.

Субмикрокристаллические и нанокристаллические металлы, полученные методами интенсивной пластической деформации, отличаются существенной нестабильностью зеренной структуры. Наблюдаемый рост зерна может быть объяснен высокими внутренними напряжениями, источниками которых являются неравновесные границы зерен и искажение кристаллической решетки [1]. В работах [2-4] показано, что температура начала рекристаллизации в металлах с ультрамелкозернистой структурой существенно ниже на 0,1 - 0,2 T_m (T_m – абсолютная температура плавления), чем после умеренной деформации. Результаты исследований температурной эволюции структуры и свойств субмикро- и наноструктурных металлов, полученных методом интенсивной пластической деформации, приведенные в работах [5, 6-8], позволили установить, что при нагреве материала происходят сложные структурные изменения, связанные с развитием процессов возврата, рекристаллизации и роста зерна и, как следствие, потерей высоких физико-механических свойств, полученных после метода интенсивной пластической деформации.

Установлено, что высокие механические свойства для титана сохраняются до размеров зерна 250нм [9,10].

Развитие процессов возврата зерен связано с перераспределением и аннигиляцией дислокаций на границах и в теле зерен, приводящих к уменьшению внутренних напряжений. Присутствуют также рекристаллизационные процессы, приводящие к росту зерен, последовательность этих процессов определяется химическим составом и природой металла (энергией дефектов упаковки, типом кристаллической решетки), а также условиями интенсивной пластической деформации, которые определяют характер исходных наноструктур [11-13].

Причиной начала роста зерен в нанокристаллах при относительно низких температурах являются не только малый размер зерен, но, прежде всего, повышенная подвижность границ зерен, обусловленная низкой энергией активации зернограничной диффузии [14,15].

Большинство деталей, имеющих субмикро- и нанокристаллическую структуру, изготовляются с помощью механической обработки резанием.

Процесс резание представляет собой сложный процесс пластической деформации, сопровождаемый интенсивным тепловыделением при значительных напряжениях в зоне контакта «инструмент – обрабатываемый материал» [16].

В качестве обрабатываемого металла выбран технически чистый титан с субмикрокристаллической и крупнокристаллической структурой. В качестве инструментального материала для режущего инструмента - ВК8. Обрабатываемая заготовка – вал, диаметр образца – 50мм, длина – 100мм. Обработка проводилась на токарном станке модели 16К20.

Для определения средней температуры в зоне резания использовали метод естественной термопары.

По проведенным экспериментам построен график зависимости температуры в зоне обработки от скорости резания в квазистационарном процессе (рис.1).



Рис. 1 – Зависимость изменения температуры в зоне резания от скорости резания

Установлено, что температура в зоне резания при обработке технически чистого титана с субмикрокристаллической структурой составляет 873К, что на 15-20% выше, чем при обработке крупнокристаллического титана (при обработке с низкими скоростями резания). При обработке резанием со скоростями превышающими 170-200м/мин разница температур для субмикро- и крупнокристаллического титана нивелируется.

Температуры, возникающие в зоне резания (до 1273К) и время воздействия теплового источника, вызывают рост зерна и резкое снижение физико-механических свойств субмикро- и наноструктурного металла, что значительно снижает эффективность работы изделий из данных металлов.

Оценить эффективность механической обработки можно по состоянию поверхностного слоя обработанной заготовки. Титан, имея низкие характеристики по теплопроводности, способствует концентрации высоких температур в поверхностном слое заготовки и снижения эксплуатационных показателей. Важно оценить уровень

распространения критических температур, которые оказывают влияние на структурные изменения материала, приводящие к уменьшению физико-механических показателей, в глубину поверхностного слоя заготовки и, таким образом, установить рациональные условия обработки.

В работе проведен анализ распределения температурных полей и накопления тепла в заготовке при точении путем моделирование.

В ранее представленных в литературе [17-20] моделях анализа теплового состояния при точении обязательно присутствуют характеристики, которые определяют точность результатов моделирования. Одной из них является величина тепловыделения в месте контакта «резец-заготовка». Вторым важным фактором является интенсивность теплообмена, которая характеризуется коэффициентом теплоотдачи в воздух или технологическую среду. Коэффициент теплоотдачи зависит от геометрии детали, частоты вращения заготовки и среды охлаждения. Перечисленные характеристики моделей являются индивидуальными для той или иной технологии обработки, геометрической конфигурации детали, способов охлаждения заготовки и зоны резания.

Одним из эффективных путей определения таких характеристик является путь их идентификации с использованием различного рода экспериментальной информации о процессах теплообмена детали с окружающей средой.

При расчетном прогнозировании перераспределения температурных полей в качестве исследуемой детали была выбрана цилиндрическая заготовка из технически чистого титана диаметром 5мм (прототип стоматологического шпифта). Процесс точения, заготовка обрабатывалась в три прохода.

Для решения задачи моделирования распределения тепловых полей в обрабатываемой заготовке принята физическая модель рассматриваемого процесса теплообмена цилиндрической детали с окружающим воздухом (рис. 2).



Рис. 2 – Физическая модель процесса теплообмена заготовки при точении титана.

Геометрия области решения представляет собой двухмерную область в цилиндрической системе координат r-z с максимальным радиусом r_{max} и высотой z_{max} . На поверхности S_1 (вся внешняя поверхность заготовки) действует теплообмен с окружающим воздухом с коэффициентом теплообмена α_1 . В зоне резания на кольцевой поверхности воздействия резца на деталь S происходит поступление теплового потока q от резца в деталь. Поверхность S, а вместе с ней и место поступления теплового потока в деталь движутся со скоростью движения резца v вдоль оси детали справа налево. Справа от резца материал детали уходит в стружку, поэтому эта часть области решения последовательно исключается.

При разработке модели приняты следующие допущения:

• задача сводится к 2-х мерной осесимметричной постановке;

- тепло от резца распределено по кольцевой поверхности резания S;
- используется эффективный радиационно-конвективный коэффициент теплоотдачи α₁.

Тепловое состояние детали описывается уравнением теплопроводности [21]:

$$C_{\rho}\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right]$$
(1)

 $T \ge 0, \ 0 < r < r_{\text{max}}, \ 0 < z < z_{\text{max}}, \ T = T(r,z,\tau), \ C = C(r,z,\tau,T), \ p = p(r,z,\tau,T), \ \lambda = \lambda(r,z,\tau,T)$ с начальным условием: $T(r,z,0) = T_0$

и следующими граничными условиями:

- на подвижной границе (генерирование тепла от инструмента):

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} = q, \\ S = S(r, z, \tau)$$

теплообмен заготовки с воздухом:

$$-\lambda \frac{\partial T(r_{\max}, z)}{\partial r} = \alpha_1 \cdot \left[T_{W}(r_{\max}, z, r) - T_z \right]$$
(3)

$$-\lambda \frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial z} = \alpha_1 \cdot \left[T_W(r, 0, \tau) - T_S \right]$$

$$(4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z_{\max}, r)}{\partial z} = \alpha_1 \cdot \left[T_{w}(r, z_{\max}, r) - T_s \right]$$
(5)

Для решения данной задачи на основе модели (1)-(5) в среде программного комплекса ANSYS создана, конечноэлементная, модель. Моделировалось многопроходное точение. Количество элементов составляло 300, узлов - 341. Для моделирования поверхностного слоя, получаемого впоследствии лезвийной обработки, конечно-элементная модель включала 750 элементов, 806 узлов.

Результаты моделирования приведены на рис. 3-5

Скорость движения резца v зависела от текущего радиуса резания r. В соответствии с этой скоростью на каждом проходе шаг по времени численного решения выбирался таким, чтобы за этот шаг резец передвигался по поверхности заготовки на размер элемента. Все расчеты проводились с помощью программного комплекса ANSYS [22], реализующей метод конечных элементов.

С помощью экспериментальных данных, рассмотренной модели, и аналитического метода решения задач теплообмена в процессе резания [18] определены тепловой поток q от резца в заготовку и коэффициент теплоотдачи α1 между заготовкой и воздухом.

Моделирование распределения температурных полей в обрабатываемой заготовке проводилось на различных режимах резания и материала режущей части инструмента (ВК8 и синтетический алмаз). Диапазон скоростей варьировался от 50 до 120 м/мин.



резца

Рис. 3 – Распределение температурных полей, параметры обработки: инструментальный материал ВК8, диапазон скоростей 120 м/мин



температурные поля заготовки после первого прохода резца



температурные поля заготовки после третьего прохода резца



Рис. 4 – Распределение температурных полей, параметры обработки: инструментальный материал ВК8, диапазон скоростей 50 м/мин

При обработке резанием со скоростью 120 м/мин (третий проход) в прирезцовом слое (до 0,01мм) температура, проникающая в обрабатываемую заготовку, составляет 1162К. Глубина структурно измененного слоя составила 40мкм.

Согласно экспериментально-аналитической модели роста зерна в субмикро- и нанокристаллических металлах под воздействием температурного и временного факторов [23, 24], влияние температуры равной 1162К в течение 0,01с приведет к росту зерна до 420нм, при исходном размере зерна 250нм.



прохода резца



Рис. 5 – Распределение температурных полей, параметры обработки: инструментальный материал синтетический алмаз, диапазон скоростей 120м/мин

Снижение скоростей резания, на третьем проходе до 50 м/мин, приводит к снижению интенсивности теплового потока, температура прирезцового слоя не превышает 817К и из-за кратковременного воздействия (0,02с) не приводит к структурным изменениям. Однако, при проведении обработки в большее количество проходов, накопленная теплота в поверхностном слое (0,25мм) может превысить 873К, т.к. накопленная теплота в поверхностном слое после трех проходов составляет 782К, что может привести к структурным изменениям в заготовке. Таким образом, при обработке с числом проходов более трех рекомендуется снизить скорость резания до 30-40 м/мин.

Моделирование показало, что применение в качестве инструментального материала синтетического алмаза, позволяет обрабатывать субмикрокристаллический титан со скоростью 120м/мин с сохранением высоких физикомеханических характеристик исходной заготовки.

Для проверки результатов, полученных моделированием при условии воздействия критической температуры, приводящей к изменению микроструктуры титана, приведены исследования изменения микротвердости от глубины измененного слоя. Исследования проводились с использованием метода косых шлифов. График зависимости микротвердости от глубины структурно измененного слоя представлен на рис.6.



Рис. 6 – График зависимости микротвердости от глубины структурно измененного слоя

Разность между экспериментальными данными и данными, полученными моделированием, не превышает 15%, что удовлетворяет точности инженерных расчетов.

Исследования микроструктуры субмикрокристаллического технически чистого титана ВТ1-00 проводились на сканирующем электронном микроскопе типа Hitachi S-4800 (Япония). В качестве реактива для выявления микроструктуры использовался раствор, состоящий из 10% плавиковой кислоты, 3% азотной кислоты и воды [25].

Рассмотрим структуры субмикрокристаллического титана, подвергнутого лезвийной обработки с различными условиями обработки. На рис. 7а представлен металлографический снимок структуры титана BT1-0 при обработке со скоростью V=30м/мин, подачей S = 0,09мм/об и глубиной резания t=0,5мм. Снимок иллюстрирует сохранение субзеренной структуры титана со средним размером субзерна 200нм. Изменение условий обработки (V=120м/мин, S = 0,14мм/об, t=0,5мм) приводит к возникновению процесса рекристаллизации (рис. 7б). В структуре α -пластин появляются новые равноосные α -зерна, для роста которых границы исходных α -субзерн не служат существенным препятствием, поскольку представляют собой скопление зернограничных дислокаций. За счет соседних α -субзерн в процессе рекристаллизации новые равноосные α -зерна достигают в среднем размера 450нм.



a)

б)

Рис.7 – Заготовки, полученные ИПД и обработанные при различных режимах резания: а) V=30м/мин, S = 0,09мм/об, t=0,5мм; б) V=120м/мин, S = 0,14мм/об, t=0,5мм.

Полученные экспериментальные данные подтверждают адекватность конечно-элементной модели перераспределения тепловых полей в обрабатываемой заготовке титана.

Проведенные исследования позволяют установить область рациональных условий обработки технически чистого титана с субмикрокристаллической структурой.

Рациональными режимами резания для титана с нано- и субмикрокристаллической структурой при использовании вольфрамокарбидосодержащих инструментов является скорость резания 40-50м/мин, подача 0,1мм/об. При использовании в качестве инструментального материала синтетического алмаза скорость резания можно увеличить до 120м/мин.

Эти условия обработки обеспечивают поддержание на исходном высоком уровне физико-механические свойства изделия (микротвердость 2900МПа), что обеспечивает эффективное применение титановых изделий для медицинской и биологической промышленности.

Список литературы: 1. *Inyoung K., Won-Sik J., Jongyoul K., Kyung-Tae P., Dong H.S.* Deformation structures of pure Ti produced by equal channel angular pressing // Scripta Materialia – 2001. – 45 – P.575-581. 2. Дестярев М.В., Воронова А.В., Губернаторов В.В., Чащухина Г.И. О термической нестабильности микрокристаллической структуры в однофазных металлических материалах // ДАН. 2002. Т.386. №2. С. 180-183. 3. Lian J., Valiev R.Z., Baudelet B. On the enhanced grain growth in ultra fine grain metals // Асta metall. material. 1995. V.43. P. 661-668. 4. Амирханов И.М., Исламгалиев Р.К., Валиев Р.З. Релаксационные процессы и рост зерна при изотермическом отжиге ультрамелкозернистой меди, полученной интенсивной пластической деформацией // ФММ. 1998. Т.86. №4. С. 99-105. 5. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформацией. - М.: Логос, 2000. - 272 с.

6. Чувильдеев В.Н., Копылов В.И., Нохрин А.В., Макаров И.М., Малашенко Л.М., Кукаренко В.А. Рекристаллизация в микрокристаллических меди и никеле, полученных методами РКУ-прессования. І. Структурные исследования. Эффект аномального роста // ФММ. 2003. Т.96. №5. С. 51-60. 7. *Миглерини М., Каньух Т., Павук М., Йираскова И., Зборил Р., Машлань М., Швец П.* Эволюция структуры в наноскристаллических сплавах с ростом температуры // ФММ. 2007. Т.104. №4. С. 349-359. 8. *Нутрhrey F.J., Hatherly М.* Recrystallization and related annealing phenomena. Great Britain: Pergamon, 1996, Р.497. 9. Дегтярев М.В., Воронова Л.М., Чашухина Т.И. рост зерна при отжиге армко-железа с ультрадисперсной структурой различного типа, созданной деформацией сдвигом под давлением // ФММ – 2005. – Т.99 - №3 – С.58-68. 10. *Салищев Г.А., Галеев Р.М.* Формирование субмикрокристаллической структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. №2. С. 19-26. **11.** Семенова И.П., Коршунов А.И., Салимгареева Г.Х., Латыш В.В., Якушина Е.Б., Валиев Р.З. Механическое поведение ультрамелозернистого титана, полученного с использованием ИПД //ФММ – 2008. – Т.106 - №2 – С.116-22423. **12.** Попова Е.Н. Влияние степени деформации на структуру и термическую стабильность нанокристаллического ниобия, полученного сдвигом под давление // ФММ – 2007. – Т.103 - №4 – С.426-432. **13.** Перевезенцев В.Н., Пульшин А.С. Теория аномального роста зерна в субмикрокристаллических материалах, полученных методом интенсивной пластической деформации //ФММ. - 2006. - Т.120. - №1. - С. 33-37. **14.** Кесарев А.Г., Кондратьев В.В. О влиянии внутренних напряжений на диффузию в наноструктурных сплавах // ФММ. – 2007. – Т.104 - №1 – С. 5-11. **15.** Миронов С.Ю., Мышляев М.М. Анализ эволюции дислокационных границ в ходе холодной деформации микроструктуры титана //ФТТ – 2007. – Т.49 - №5 – С.815-822. **16.** Trent Ed. M., Wright P.K. Metal cutting, Butterworth – Heinemann, USA, 2000, 446р. **17.** Warneck G. Modeling of thermo-elastic workpiece deformation during turning of hardened steel //Product. Engng. – 1997. – Vol. IV/2. – Р.51-54. **18.** Резников А.Н. Теплофизика резания – М.: Машиностроение. – 1969. – 102с. **19.** МсКеоwn P.A. Reduction and compensation of thermal errors in machine tools //Ann. of the CIRP. – 1995. – Vol. 44/2. – Р.589-598.

20. Stephenson D.A. Thermal expansion of the workpiece in turning // J. Engn. for Industry. – 1995. – Vol. 117. – Р.542-550. **21.** Резников А.Н., Резников Л.А. Основы расчета тепловых процессов в технологических системах – Куйбышев: КуАИ, 1986 – 153с. **22.** Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. – М.: Машиностроение, 2004 – 512с. **23.** Верезуб Н.В., Каптай Дж., Симонова А.А. Методология механических процессов обработки объемных нанокристаллических материалов // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. 2008. Вип.2. С. 19 - 26. **24.** Картау G. Modeling Interfacial Energies in Metallic Systems // Materials Science Forum, 2005. V. 473-474. Р. 1-10. **25.** Мальцев М.В. Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов – М.: Металлургия, 1971 – 488с.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

Е. Б. Сорока, канд. техн. наук, С. А. Клименко, д-р техн. наук, М. Ю. Копейкина, канд. техн. наук, Киев, Украина

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИМИ

Ideological basic for synthesis of support system for coated goods performance is proposed. As a principle concept about optimal architecture and properties of surface layers, which are purposefully created subject to conditions of operating loading, is taken

Введение. Необходимость защиты и упрочнения поверхности деталей машин, даже в случае, когда в их конструкциях используются материалы с улучшенным комплексом физико-механических свойств, вытекает из двух обстоятельств. Во-первых, именно поверхностные слои являются наиболее уязвимыми при работе режущего, штампового, мелющего и других видов инструментов, а также в парах трения. Так, износ, коррозионная и эрозионная стойкость, трещинообразование определяются свойствами тонкого поверхностного слоя. Во-вторых, в поверхностных слоях нагруженных тел развиваются процессы, являющиеся синергетическим активатором процессов во всем объеме материала. Именно состояние поверхностных слоев и явления в них обусловливают пластическое поведение материалов деталей, а также их усталостные и демпфирующие характеристики [1, 2].

Учитывая сложность и взаимовлияние факторов, имеющих место при создании изделий с упрочненным поверхностным слоем, в частности с покрытиями, для заданных условий эксплуатации, для их рассмотрения целесообразно использовать подходы системного анализа.

Постановка задачи. Основной функцией $\{F\}$ системы является обеспечение работоспособности (прочности и износостойкости) изделия с покрытиями в целом и его отдельных элементов. Обеспечить эту функцию призвана структура системы, представляющая собой множество S = $\{M, P, R\}$, где M – элементы системы, P – свойства элементов системы, R – связи элементов. Связи между системой и ее окружением представляют собой входы $\{X\}$ и выходы $\{Y\}$. Функция системы $\{F\}$ состоит в преобразовании входов $\{X\}$ в выходы $\{Y\}$. Элементы системы (подсистемы) на различных уровнях решают вопросы успешной реализации основной функции $\{F\}$. Выделение таких структурных уровней связано с разными подходами к обеспечению решения задачи. На взгляд авторов такая система представляется трехуровневой.

На третьем уровне $\{M_3\}$ решаются задачи формирования архитектуры покрытий в соответствии с эпюрой эксплуатационного нагружения рабочих поверхностей изделия. Речь идет о формировании покрытий как сплошного, так и дискретного типов с постоянными и переменными геометрическими параметрами участков разной формы. При этом необходимо обеспечить формирование таких параметры покрытия и такое состояние его поверхностного слоя, которые отвечали бы приработанному состоянию для условий конкретного эксплуатационного нагружения, что и решается на втором уровне $\{M_2\}$ системы. Тут рассматриваются вопросы технологического обеспечения практического создания покрытия в соответствии с рекомендациями, полученными с уровня $\{M_3\}$, обеспечения в покрытии и его поверхностном слое состояния, отвечающему равновесному, формируемому при приработке. На уровнях $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ рассматриваются функционально ориентированные покрытия на локальных участках изделия, контактное нагружение и эксплуатационные требования к которым могут быть различными. Первый уровень системы $\{M_1\}$ связан с формированием комплекса функциональных покрытий на всех участках изделия, подвергающихся различному эксплуатационному нагружению.

Предварительная подготовка поверхности под нанесение покрытия должна рассматриваться как отдельная составляющая технологии, оказывающая, за счет технологической наследственности, влияние на всю систему обеспечения работоспособности изделия с покрытиями.

Подходы к решению задачи. В условиях эксплуатационного нагружения в самой системе формируется равновесный, с точки зрения энергетических затрат, рельеф, который оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики системы. Предоставленная самой себе, система формирует грубый рельеф, как результат схватывания, задира, растрескивания по слабым местам, причем трещина может прорастать из покрытия в основу, отслоения участков покрытия с образованием «лоскутковой» структуры в результате развития магистральной интерфейсной трещины. Поэтому возникает задача формирования устойчивых форм с целью сохранения исходной поверхности, что позволит расширить область установившегося износа и продлить ресурс изделия с покрытием. Следует отметить, что износостойкость покрытия, например, на поверхности режущего инструмента, должна улучшить качество поверхности, обработанной этим инструментом. Как отмечалось, эта задача решается на третьем уровне {М3} при проектном создании покрытий соответствующей архитектуры: одно- и многослойных, разнотолшинных, градиентных покрытий, а также покрытий дискретного типа. А обеспечение требуемых геометрических, химических, физико-механических параметров и структуры покрытия, показателей состояния его поверхностного слоя, возможно более отвечающих приработанному уровню для предъявляемого к отдельным участкам детали с покрытием эксплуатационного свойства решается технологически на втором уровне {М₂}. Рассматриваются технологические особенности, оборудование и условия формирования покрытий, методы их финишной обработки, а также вопросы технологического обеспечения качества и эксплуатационных свойств изделий с покрытиями. На технологическом уровне обеспечивается физико-механические характеристики, а также геометрические характеристики, связанные с шероховатостью, волнистостью, структурой поверхностных слоев. Между подсистемами {М3} и {М2} существует сложное взаимодействие – создание определенной архитектуры покрытия (слойность, градиентность, дискретность и т.д.), разработанной на уровне $\{M_3\}$, требует технологического обеспечения на уровне $\{M_2\}$ с учетом технологичности метода нанесения и возможностей имеющегося оборудования. Технологическое обеспечение состояния поверхностного слоя, отвечающего приработанному, на уровне $\{M_2\}$ связано, в свою очередь, с архитектурными решениями уровня $\{M_3\}$. Уровень $\{M_1\}$ призван решить вопрос о формировании покрытия на всех участках одного изделия или на различных изделиях в зависимости от условий эксплуатационного нагружения и материала изделия. Реализация разработки на уровне $\{M_1\}$ неразрывно связана с подсистемами $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ – она обусловлена синергетическим объединением в пределах изделия или группы изделий результатов, полученных на уровнях $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$.

Свойства элементов подсистемы на всех уровнях вместе с условиями эксплуатации формируют напряженное состояние (НС) покрытия (рис. 1), основы, интерфейсной зоны и, таким образом, изделия с покрытиями в целом.

Воздействуя через изменение HC на свойства (P} подсистем {M}, можно направлено управлять работоспособностью, в частности износостойкостью, изделий с покрытиями. Так, на уровне {M₂} формируется структура покрытия, состояние его поверхностного слоя, которые влияют на знак и уровень остаточных напряжений, когезионную и адгезионную прочность композита «основа-поркрытие». Характер рельефа в поверхности покрытия определяет размер пятен контакта, нормальные и сдвиговые усилия на них, а, следовательно – время приработки и схватываемость. Химический состав покрытия, определяемый свойствами уровней {M₃}, {M₂}, значительно влияет на контактное взаимодействие.

Результаты предварительных оценок напряженного состояния, выполненные при проектировании изделия с покрытиями на уровне {M₃}, с учетом эксплуатационного нагружения позволяют прогнозировать величину эффективных напряжений, непосредственно влияющих на работоспособность изделия. Окончательная величина эффективных напряжений определяется с учетом результатов, полученных на этапе {M₂}.

Предварительная подготовка поверхности под нанесение покрытия, включающая в себя, например, механическую обработку поверхности, формирование упрочненных слоев (ионное азотирование в плазме тлеющего разряда, импульс-лазерное воздействие), оказывает влияние на физико-механические характеристики изделия с покрытиями. Это выражается в изменении сопротивления термопластическим деформациям, а также трансформации распределения остаточных напряжений в композиции основа-покрытие после нанесения покрытия на модифицированную поверхность.



Рис. 1 - Создание НС в изделии с покрытиями на трех уровнях системы

Геометрические параметры элементов архитектуры покрытия такие как: количество и толщина слоев, подслоев и буферных слоев, форма и размеры дискретных участков покрытия, их сплошность оказывают влияние на характеристики когезионной прочности покрытия, адгезионную прочность, величину и распределение в покрытии как остаточных, так и эксплуатационных напряжений. И наоборот, напряжения, являющиеся результатом нанесения покрытия и (или) возникающие в эксплуатационных условиях, влияют на геометрические параметры участков изделия с покрытиями.

Как следует из вышеизложенного, свойства элементов каждой из подсистем $\{M_3\}$, $\{M_2\}$ и $\{M_1\}$ и их взаимодействия оказывают непосредственное влияние на напряженное состояние изделия с покрытиями. В результате сложного взаимодействия подсистем архитектуры покрытий $\{M_3\}$, технологического обеспечения $\{M_2\}$ и формирования изделия с покрытиями, в зависимости от условий эксплуатационного нагружения, преобразование входов системы $\{X\}$ в ее выходы $\{Y\}$ обусловлено HC изделия с покрытиями.

Это дает основание рассматривать вопросы о формировании устойчивой естественной архитектуры поверхностного слоя, повышающей самоорганизацию системы при эксплуатационном нагружении. В этом свете представляется справедливым подход, когда создание «рационального» НС рассматривается комплексно, как результат вклада эффектов на трех уровнях системы. Под «рациональным» НС понимается сочетание «полезного» уровня остаточных напряжений сжатия в покрытии и минимального вклада от эксплуатационных напряжений, связанных с условиями применения изделия. При этом, рациональным НС в изделии формируется за счет эффектов во всей системе – в подсистемах архитектура покрытий {M₃}, технологического обеспечения {M₂}, формирования изделия с покрытиями {M₁} с учетом эксплуатационного нагружения.

Для покрытий дискретного типа, например, предполагается, что уменьшение поверхности контактных участков изделия в зоне трения приводит к снижению касательной составляющей нагружения, а значит, к уменьшению схватывания. Следует также отметить, что междискретные промежутки (основной материал), при этом, не испытывают воздействия касательной составляющей нагружения: на них касательные напряжения равны нулю, а нормальные напряжения за пределами соседних дискретных участков взаимокомпенсируются (рис. 2).

Уменьшение площадки контакта, приводя, с одной стороны, к снижению касательной составляющей нагружения, и вызывает, с другой стороны, увеличение удельной нормальной распределенной нагрузки. Вместе с тем, показано [3], что величина удельной нормальной распределенной нагрузки возрастает меньше, чем уменьшается касательная нагрузка. Этим объясняется, например, уменьшение силы резания при работе лезвийного режущего инструмента с покрытием дискретного типа



Рис. 2 – Эпюры напряжений вдоль оси У под действием касательной составляющей нагружения

Как известно, площадь контакта в условиях эксплуатационного нагружения изделия не является постоянной: она изменяется с изменением контактного давления, а также зависит от размеров и материала контртела, например, обрабатываемого материала при резании или штамповке детали. Можно показать, что при несовпадении зоны нагружения и участка со сплошным покрытием (нагруженная зона меньше, чем поверхность с покрытием) максимальные напряжения в покрытии выше, чем в случае совпадения зоны нагружения и зоны изделия с покрытием. При использовании покрытия дискретного типа в силу несвязанности между собой дискретных участков, зона занимаемая покрытием и зона нагружения совпадают [4]. Кроме того, изолированный участок покрытия является более жестким, чем сплошное покрытие.

Учитывая отмеченное, ниже представлено обоснование целесообразности применения покрытий с дискретной топографией поверхности с точки зрения минимизации НС в композиции «основа-покрытие» при эксплуатационном нагружении (уровень {M₃}).

Как известно, наличие эксплуатационных напряжений растяжения в поверхностных слоях основного материала, приводит к растрескиванию цельных покрытия с созданием регулярной сетки трещин. Определение размера дискретных участков с учетом напряжений растяжения, передающихся в покрытие через поверхность адгезионного контакта, а также остаточных напряжений в покрытии дает возможность спроектировать устойчивую естественную дискретную архитектуру покрытия [5]. Априори создание покрытия с топографией поверхности, аналогичной той, которая возникла бы в результате растрескивания покрытия, обусловливает существенное повышение самоорганизации системы. Тем самым, на уровне проектирования покрытия {M₃} в подсистеме архитектуры покрытий, обеспечивается минимизация эксплуатационного изменения формы (износа) упрочняемой поверхности.

Обеспечение износостойкости поверхностного слоя покрытия зависит также от уровня остаточных напряжений, которые, наряду с эксплуатационными, вносят свой вклад в уровень эффективных напряжений. Как показывает анализ литературных данных, остаточные напряжения сжатия повышают износостойкость изделия с покрытием, а также обеспечивают улучшение механических характеристик всего упрочненного изделия [6, 7]. Вместе с тем, слишком высокий уровень таких напряжений в покрытии приводит к отслоению покрытия от основы, охрупчиванию и выкрашиванию его поверхностного слоя [8]. Представляется, что дискретизация покрытия ограничит величину остаточных напряжений, а выбор геометрических параметров (толщины и размеров отдельных участков) покрытия позволит сформировать рациональное HC при сохранении остаточных напряжения сжатия на полезном уровне. В решении этой задачи задействованы уровни $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ системы, выходы которых $\{Y_3\}$, $\{Y_2\}$, способствуя формированию рационального HC системы, позволяют реализовать основную функцию системы $\{F\}$ – высокую работоспособность изделия с покрытиями.

Помимо изделия с покрытиями в целом, а также основы и покрытия как отдельных элементов, после принятия, исходя из анализа HC, решения о дискретизации поверхности, рассмотрению подлежат отдельные участки покрытия (рис. 3). Так, снижение остаточных напряжений сжатия в отдельном участке дискретного покрытия по сравнению со сплошным покрытием, а также выбор толщины и протяженности отдельных дискретов даст возможность сохранить целостность поверхность поверхность и спокрытием, исключив его разрушение выпучиванием [9].



Рис. 3 – Идеология создания дискретной архитектуры на основе анализа НС

Исходя из условий нагружения понятно, что в процессе деформирования твердый участок покрытия на упругом основании при воздействии нормальной сосредоточенной нагрузки будет стремиться отслоиться от основы в краевых зонах. Избежать этого можно исходя из анализа формы изогнутой оси элемента покрытия, что позволяет найти такое сочетание геометрических размеров дискретного участка, которое обеспечит покрытию способность не отслаиваться по краям, а вдавливаться в основу без разрушения [9].

Применительно к дискретным покрытиям реализация основной функции системы {F} связана с выбором геометрических параметров упрочняющего или модифицированного слоев: толщины, размера дискретных участков, величины междискретных промежутков для конкретных условий эксплуатационного нагружения с учетом физикомеханических характеристик основного материала.

Практическое формирование с дискретной архитектуры осуществляться в покрытия подсистеме технологического обеспечения {М2}.

Как отмечалось выше, для практической реализации технологий напыления важным являются вопросы предварительной подготовки поверхностей изделия под упрочнение, в том числе и дискретными покрытиями. В этой связи представляется интересным рассмотреть влияние предварительной механической обработки основы и предварительной операции по упрочнению поверхностного слоя основного материала (азотирование) как на НС, так и на состояние поверхностного слоя покрытия.

Этапы методологии повышения работоспособности на этапе проектирования изделия с покрытием дискретного типа можно представить следующим образом:

обоснование дискретной топографии покрытия с точки зрения минимизации эксплуатационных напряжений в изделии и обеспечения «полезного» уровня остаточных напряжений сжатия в покрытии;

- выбор параметров отдельных участков покрытия, гарантирующих отсутствие когезионного растрескивания покрытия и адгезионного отслоения в области интерфейса;

выбор параметров дискретной архитектуры для минимизации эффективных напряжений в изделии – в покрытии, в основном материале, в интерфейсной зоне.

Выводы. Предложенный системный подход предопределяет необходимость проведения взаимосвязанных исследований по изучению и моделированию НС покрытий и всего изделия с покрытиями при различных видах эксплуатационного нагружения. Его можно рассматривать как идеологическую основу для синтеза системы обеспечения работоспособности изделий с покрытиями, исходя из представлений об архитектуре и свойствах поверхностного слоя, направленно формируемых в зависимости от условий эксплуатационного нагружения с целью повышения самоорганизации системы.

Список литературы: 1. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах. Под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: СО РАН, 2006. – 519 с.; 2. Иванова В. С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.; 3. Антонюк В. С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу / В. С. Антонюк // Автореф. дис. ... докт. техн. наук, НТУ України «КПІ» – Київ, 2006. – 35 с.; 4. Сорока Е. Б. Упрочнение разделительных штампов покрытиями дискретной структуры / Е. Б. Сорока, В. А. Титов, Б. А. Ляшенко, О. В. Герасимова // Вісник національного технічного університету України «Київський Політехнічний інститут»: Машинобудування. – К.: НТУ України «КПІ», 2008. – Вип. 52. – С. 341 – 351.; 5. Ляшенко Б. А. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений / Б. А. Ляшенко, Е. Б. Сорока, А. В. Рутковский, Н. В. Липинская // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 119–125.; 6. Кюске F. Соаtted Tools for Metal Cutting – Features and Appications / F. Klocke, T. Krig // СІРР Аnnals – Мапиfacturing Тесhnology. – 1999. – 48, № 2. – С. 515–525.; 7. Табаков В. П. Механизи разрушения износостойких покрытий режущего инструмента в процессе резания / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 6. – С.41–45.; 8. *Rickerby D.S.* Structure, properties and applications of TiN coatings produced by sputter ion plating / D. S. Rickerby, R. В. Newbery // Vacuum. – 1988. – 38, № 3. – С. 161–166.; 9. Антонюк В. С. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей / В. С. Антонюк, Е. Б. Сорока // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 8. – С. 8–13.

Поступила в редколлегию 15.06.2009

Р.М. Стрельчук, М.Д. Узунян, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ С НАНОСТРУКТУРНЫМ ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ «ВОЛКАР»

In the article the features of co-operation of diamond circles are considered with the nanostructure hard alloy of «WolKar». On the basis of these features workability of nanostructure hard alloy of «WolKar» is determined.

Наноструктурный твердый сплав на основе монокарбида вольфрама «ВолКар», характеризуется высокой износостойкостью и несомненно перспективен в качестве инструментального режущего материала особенно при обработке высокотвердых сталей и сплавов. Применение режущих пластин из рассматриваемого инструментального материала позволяет существенно повысить производительность обработки за счет увеличения скорости резания и в ряде случаев заменить дорогостоящий инструмент из кубического нитрида бора [1]. Поэтому естественно предположить, что, обладая повышенными по сравнению с традиционными твердыми сплавами физикомеханическими свойствами, наноструктурный твердый сплав «ВолКар» характеризуется худшей обрабатываемостью. Поэтому оценка обрабатываемости этого материала с применением технологии алмазно-искрового шлифования (АИШ) представляет значительный интерес. Ранее нами были определены оптимальные электрические параметры АИШ по минимальной себестоимости шлифования (среднее значение величины технологического тока $I_{cp} = 5A$, частота электроимпульсов $f = 22 \kappa \Gamma$ ц, скважность $n_{ck8} = 2$). Вместе с тем обрабатываемость материала удобно оценивать с позиций особенностей его взаимодействия с рабочей поверхностью алмазного круга.

Одним из наиболее распространённых критериев оценки этого взаимодействия является коэффициент шлифования (*Кш*). Он отражает процесс резания в динамике, влияние температурно-скоростного фактора, характеризует свойства обрабатываемого материала, условия внедряемости рельефа в него, а значит и сравнительную режущую способность круга. Рассматриваемый критерий меньше единицы и при определенных условиях обработки может приближаться даже к коэффициенту трения пары – шлифовальный круг – обрабатываемый материал [2].

Коэффициент шлифования определяется из соотношения:

$$K_{III} = \frac{Pz}{Py}$$

где *Pz* – тангенциальная сила резния, H; *Py* – радиальная сила резния, H.

Коэффициент шлифования оценивался в зависимости от различных факторов: режимов резания – нормального давления (P_H), скорости резания (V), характеристик алмазного круга – зернистости (Z), концетрации (K), а также времени шлифования (T).

Для сравнения исследовалась обрабатываемость пластин из наноструктурного твердого сплава «ВолКар» и традиционного твёрдого сплава ВК6.

Эксперименты проводились на универсально-заточном станке модели 3Д642E, модернизированном применительно к обработке методом АИШ, а в качестве источника тока был выбран специальный генератор импульсов.

В условиях АИШ во всем диапазоне увеличения нормальных давлений Ku возрастает (рис. 1), что объясняется развитостью рабочей поверхности круга, высокой внедряемостью режущих микрокромок и, как следствие, опережающим ростом силы Pz. Дальнейшее повышение нормального давления приводит к замедлению роста силы Pz из-за некоторого притупления режущих элементов и периодически появляющейся вероятности контакта связки круга с обрабатываемым материалом. При АИШ взаимодействие обрабатываемого материала с кругом определяется в основном характером контактирования его с алмазными зернами, трение связки занимает небольшую долю в общей работе шлифования и оказывает слабое влияние на изменение тангенциальной силы Pz. В связи с изложенным следует отметить, что по величине Ku можно установить сравнительную обрабатываемость материалов, а именно – большим значениям Ku соответствует лучшая обрабатываемость.



Рис. 1 – Влияние нормального давления на коэффициент шлифования 1–ВК6, 2 – «ВолКар»; V=25 м/с; круг 12А2-45° АС6 100/80 М1-01-4.

Изменение скорости резания от 15 до 35 м/с оказывает весьма незначительное влияние на Кш (рис. 2), что

связано с постоянством сил резания при алмазно-искровом шлифовании, и может быть объяснено постоянством коэффициентов трения алмаза с обрабатываемом материалом при повышении скорости шлифования. Известно, что при точении материалов, не вступающих во взаимодействие с алмазом, и когда практически имеет место чистый контакт его с обрабатываемым материалом, силы резания с увеличением скорости также не изменяются [3].



Рис. 2 – Влияние скорости резания на коэффициент шлифования 1–ВК6, 2 – «ВолКар»; Рн=0,8 МПа; круг 12А2-45° АС6 100/80 М1-01-4.

При алмазно-искровом шлифовании изменение зернистости в диапазоне от 50/40 до 160/125 незначительно влияет на Кш (рис. 3), что объясняется ростом сил резания в связи с количественным фактором и соответственно возрастанием суммарного сечения среза. Можно предположить, что количественный фактор с повышением зернистости при АИШ твердых материалов не играет существенной роли, так как у кругов повышенных зернистостей крупные зерна, имеющие более низкую динамическую прочность по сравнению с мелкими зернами, при износе и поверхностном разрушении образуют большое количество микрокромок, и таким образом фактор зернистости в этих условиях нивелируется.



Рис. 3 – Влияние зернистости кругов алмазов на коэффициент шлифования 1–ВК6, 2 – «ВолКар»; Рн=0,8 МПа; V=25 м/с; круг 12А2-45° АС6 М1-01-4.

Поскольку алмазно-искровое шлифование обеспечивает активную самозатачиваемость режущего рельефа и рабочая поверхность круга практически не засаливается [4], то при шлифовании твердого сплава «ВолКар» и обычных твёрдых сплавов коэффициент шлифования Kw в течении длительного промежутка времени практически не изменяется (рис. 4). Только в условиях шлифования, когда режущая поверхность приобретает устойчивый характер, и круг работает в режиме самозатачивания при весьма незначительном контакте связки с материалом, по величине Kw можно устанавливать сравнительную обрабатываемость любых твердых сплавов, а именно – большим значения Kw соответствует лучшая обрабатываемость. В условиях же обычного алмазного шлифования лучшая обрабатываемость может соответствовать меньшим значениям Kw - здесь сказывается фактор более медленного сглаживания рельефа круга, что позволяет ему сохранять разновысотность и уменьшить участие связки во взаимодействии с материалом более длительное время.



круг 12А2-45° АС6 100/80 М1-01-4.

В заключении следует отметить, что несмотря на более низкую обрабатываемость, превалирующим фактором успешного применения наноструктурного твердого сплава «ВолКар» следует считать качественный фактор, выражающийся в суммарной технологической себестоимости, учитывающий как удельную себестоимость шлифования, так и себестоимость точения этим материалом, определяемую длиной пути резания. Список литературы: 1.United States Patent 6,617,271,International Patent WO 2005/023729 Al. 2.Муцянко В. И., Островский В. И. Коэффициент шлифования как критерий оценки процесса // Тр. ВНИИАШ. – 1965. – № 1. – С. 64–67. 3.Зубарь В. П., Крюков В. К., Алмосов В. В. Исследование особенностей трения синтетических поликристаллических алмазов с конструкционными материалами // Резание и инструмент. – 1975. – Вып. 13. – С. 54–58. 4.Узунян М. Д., Краснощек Ю. С. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1988. – 83 с.

Поступила в редколлегию 15.07.2009

В. М. Тонконогий, д-р техн. наук, Одесса, Украина, Т. В. Попенко, П. С. Носов, канд. техн. наук, Херсон, Украина

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ КРЕДИТНО-МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБУЧЕНИЯ

Automation of the education process management under the condition of the credit-modulus system is considered as an actual task of the modern education. The article proposes a double contour model of management and a functional diagram of the automated management system of the education process.

Основная задача современного учебного заведения – подготовить выпускника, востребованного на рынке труда. Реализация этой задачи возможна только при активном внедрении инноваций, а так же применении информационных и компьютерных технологий в учебном процессе.

Автоматизация процесса обучения, использование интерактивных обучающих программ, электронных учебников и тестирующих программ, позволяет не только повысить качество обучения, но и индивидуализировать процесс обучения. Сегодня ведется активная работа по созданию и внедрению адаптивных обучающих сред, которые включают в себя огромные объемы учебной информации, средства контроля и диагностики, советующие системы, подсистемы адаптации под конкретного пользователя.

Яркими примерами таких систем являются Interbook, CALAT, ELM-ART, MANIC. Однако в существующих обучающих системах имеется еще большое количество не решенных проблем. В частности: строго структурированное содержание программы курса; фиксированные цели обучения; элементы адаптации реализованы только настройкой системы на уровень знаний или предпочтения в изложении материала по данной предметной области. Модели обучаемого не учитывают его интеллектуальную деятельность в процессе обучения, в связи с этим недостаточно разработана система управления обучением. [1,2,3]

Главной сферой применения таких систем являются корпоративные системы обучения, в которых основной единицей учебного процесса является учебный курс.

Внедрение кредитно-модульной системы, влечет за собой серьезные проблемы технологического обеспечения учебного процесса. Модульное построение образовательных программ обеспечивает гибкость содержания образования и позволяет реализовывать обучение в соответствии с индивидуальными способностями и потребностями обучающихся. Студент получает возможность обучаться по индивидуальному плану, в котором присутствует вариативная часть, определяемая как учебным заведением, так и самим обучающимся. Однако в таких условиях классические схемы централизованного управления обучением (фиксированные сроки прохождения контроля, жесткое планирование следующего этапа обучения, строго определенные цели обучения), должны трансформироваться в более гибкие схемы, которые обеспечивают достижение целей, сформированных в терминах компетенций. Таким образом, исследование системы управления обучением и определение общих подходов к автоматизации управления является актуальной задачей современного образования. [4,5]

В целом система управления должна обеспечивать не только заданный уровень знаний и навыков, но и определенную стандартом специальности и требованиями работодателей структуру компетентности выпускника.

Организация системы управления в учебном заведении определяется организацией обратных связей, которые реализуются на различных этапах обучения. Обратная связь формируется на основе результатов диагностики, и при автоматизированном обучении, представляет собой такие формы как: рекомендации по выбору модулей; рекомендации по набору учебных элементов, составляющих модуль; выбор способа подачи учебного материала (аудио, видео ролики, тренажеры, текстовые документы); генерация учебного материала, входящего в учебный элемент; необходимость повторного изучения. Формирование обратной связи и шаг управляющего воздействия зависит от этапа обучения.

Для построения адекватной системы управления необходимо:

- проанализировать систему обратных связей, формирующих систему управления и определить шаг управляющего воздействия;

- синтезировать модель управления.

Эти подготовительные этапы позволят определить основные подходы к автоматизации гибкой системы управления.

В условиях кредитно-модульной системы дисциплина формируется из одного или нескольких зачетных модулей. Под понятием модуль (М) подразумевается информационный блок, содержащий различные виды деятельности и формы изложения учебного материала, то есть учебные элементы (УЭ) или дидактические единицы учебного материала. Количество *m* зачетных модулей в дисциплине определяется количеством кредитов ECTS, и расчитывается по формуле: m=Q/36, где Q – общий объем дисциплины.

По каждому модулю предусматривается модульный контроль, по результатам которого оценивается уровень усвоения материала, анализ результатов модульного контроля дает основания для формирования обратной связи. Однако, исследования учебного процесса в учебных заведениях I–II уровня аккредитации, позволяют утверждать, что корректировка обучения с таким шагом управляющего воздействия неэффективна. Прежде всего, это связано с тем, что у студентов этих учебных заведений еще не сформирован должный уровень мотивации и навыков самостоятельной работы. Поэтому в учебной практике вводится понятие промежуточного контроля (например, тестовый контроль после прохождения каждого учебного элемента), результаты которого дают возможность своевременно корректировать обучение (рекомендации по повторному или углубленному изучению). Формирование обратной связи с таким шагом управления даст возможность повысить уровень усвоения учебного материала и результативность модульного контроля.

Возможность вариативного выбора отдельных модулей, изучение материала в индивидуальном темпе влечет за собой разнообразие индивидуальных планов, в том, что касается набора модулей и учебных элементов модуля, то есть структуры образовательной программы.

Формирование обратной связи по результатам модульного контроля представляет собой набор модулей, рекомендуемых к дальнейшему изучению. Причем критериями выбора модулей являются не только таксономия изложения учебного материала, но и способности, желания обучающихся, а также требования стандарта специальности, в том, что касается модулей, подлежащих обязательному изучению.

При синтезе системы управления, то есть при принятии решения о том каково должно быть управление в сложившейся ситуации, необходимо учитывать как обратные связи, корректирующие уровень усвоения материала, так и обратные связи которые формируют структуру образовательной программы [6]. Двухконтурная схема структурной адаптации (рис. 1), разработанная Л.А. Растригиным, вполне соответствует поставленным условиям и позволяет построить функциональную модель автоматизированной системы обучения (рис. 2).



Рис. 1 – Двухконтурная схема структурной адаптации



Рис. 2 – Функциональная модель автоматизированной системы обучения

Модель управления, построенная по такой схеме, отражает иерархический характер управления обучением студента. На верхнем уровне производится управление структурой W, а на нижнем – управление параметрами C. Два контура управления работают в разных временных режимах: темп параметрического управления значительно выше темпа структурного. На каждый шаг структурных изменений объекта должен приходиться весь цикл параметрических изменений. А множество допустимых управлений определяется произведение множеств допустимых структур E_W и параметров E_{CW} этих структур.

Для построения автоматизированной системы обучения разработана функциональная модель (рис. 2), особенностью которой, является наличие двух блоков корректировки, которые позволяют формировать управляющие воздействия на различных этапах обучения.

Автоматизированная система обучения, имеющая такую модель системы управления, позволит не только адаптировать содержание образовательного процесса индивидуальным способностям и повысить результативность обучения, но и даст возможность гибко изменять образовательную траекторию в соответствии с изменениями запросов рынка труда и желаниями обучающихся.

Список литературы: 1. Колин К.К. Информатизация образования: Новые приоритеты. <u>http://www/smolensk.ru/user/sqma/</u>MMORPH/N-7-html/kolin/html 2. *Атанов Г.А.* Моделирование учебной предметной области, или предметная модель обучаемого. - Educational Technology & Society 4(1) 2001, С. 111-124 3. *А.Л. Ляхов, М.И. Демиденко.* Основные свойства автоматизированных систем // Моделирование и управление учебным процессом в ВУЗе. ISSN 1028-9763. Математичні мащини і системи, 2008, № 1 4. *Згуровський М.З.* Болонський процес – структурна реформа вищої освіти на європейському просторі// Освіта. Технікуми, коледжі. - №4 (10). – 2004. – С. 4 – 7. 5. *Товажнянський Л.Л. та ін.* Болонсьський процес: цикли, ступені, кредити: Монографія. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – 144 с. 6. *Растригин Л.А.* Адаптация сложных систем. – Рига.: Зинатне, 1981. – 375 с.

В. М. Тонконогий, д-р техн. наук, Одесса, Украина, Е. В. Хомутова, П. С. Носов, канд. техн. наук, Херсон, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОГО БАЛАНСА ГАЗОВ-РЕАГЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ НАНЕСЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Determination of mass balance gases of reagents in the causing ions-plasma coverage

На сегодняшний день, требования, предъявляемые в машиностроении к износостойкости режущего инструмента и повышению его скорости резания очень велики. Одним из путей повышения служебных характеристик используемых инструментов является нанесение на их рабочие поверхности износостойких покрытий со специальными свойствами. Одним из таких методов является метод конденсации в вакууме на поверхности изделия вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой - метод КИБ, разработанный в Украине [1, 2].

Однако этот метод имеет ряд недостатков, одним из которых - снижения качества поверхности изделия, как следствие неэффективного управления процессом нанесения ионно - плазменных покрытий, что может привести к неисправимому браку. Еще более усложняет проблему контроля качества нанесения покрытий – подача нескольких газов-реагентов в камеру без предварительного смешивания. В такой ситуации оператор вообще не сможет руководить процессом нанесения покрытий, при этом альтернативные способы управления данным процессом еще не разработаны [3].

Устранение указанных недостатков требует разработки принципиально новой модели подачи нескольких газов и как следствие автоматизированной системы управления балансом подачи газов-реагентов в вакуумную камеру без участия человеческого фактора.

Анализ существующих технологий нанесения покрытий и факторов, влияющих на их качество позволяет констатировать, что в ионно-плазменных технологиях имеется ряд существенных недостатков, возникающих при нанесении покрытий, а именно:

1) Отсутствие автоматизированных систем идентификации и контроля многофакторного процесса нанесения ионно-плазменных покрытий усложняет процесс его имитационного моделирования и как следствие приводит к запаздыванию принятия решений.

2) Отсутствие прогрессивных математических методов обработки параметров процесса нанесения ионноплазменных покрытий приводит к неполному анализу данного процесса.

3) Отсутствие возможности управлять балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов-реагентов, значительно повышая тем самым мобильность применения ионно-плазменных технологий.

Данные недостатки представляют проблему, которая не позволяет результативно управлять процессом подачи в вакуумную камеру нескольких газов-реагентов при нанесении ионно-плазменных покрытий методом КИБ. Поэтому, разработка математической модели подачи нескольких газов для повышения качества нанесения ионно-плазменных покрытий является актуальной задачей.

Целью исследования является повышение эффективности ионно-плазменных технологий путем разработки и внедрения автоматизированной системы анализа и управления массовым балансом газов-реагентов в условиях подачи нескольких газов.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить классификацию методов нанесения износостойких покрытий с помощью технологии КИБ, изучить проблемы автоматизации процесса нанесения ионно-плазменных покрытий в данной технологии.

2. Выбрать и обосновать критерии оценивания параметров подачи газов в технологии КИБ, а также методы контроля качества режущего инструмента с покрытием в производстве и эксплуатации.

3. Разработать математическую модель процесса нанесения покрытий на основе описания массового баланса для подачи нескольких газов в вакуумную камеру;

4. Выполнить структурный синтез автоматизированной системы управления балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов-реагентов в технологии нанесения ионно-плазменных покрытий.

Согласно цели исследования построение динамической математической модели процесса нанесения покрытий на основе описания массового баланса для *n_i* в вакуумной камере в виде системы уравнений (1) [4]:

$$\begin{cases} \frac{dM_{(1)}}{d\tau} = m_{nod(1)} + m_{nam(1)} - m_{ome(1)} - m_{pn(1)} \\ \frac{dM_{(2)}}{d\tau} = m_{nod(2)} + m_{nam(2)} - m_{ome(2)} - m_{pn(2)} \\ \dots \\ \frac{dM_{(n_{f})}}{d\tau} = m_{nod(n_{f})} + m_{nam(n_{f})} - m_{ome(n_{f})} - m_{pn(n_{f})} \\ \end{cases}, \qquad (1)$$

где:

 $M_{2a306(1),(2),...(n)}$ – масса n_i газов в вакуумной камере, кг; $m_{nod (1),(2),...(ni)}$ – приход газов за счет принудительной подачи его в камеру, кг/с; $m_{Ham(1),(2),...(ni)}$ – приход газов за счет натекания воздуха из атмосферы из-за не герметичности камеры, кг/с; $m_{orc(1),(2),...(ni)}$ – расход газов за счет работы вакуумного насоса, кг/с; $m_{xp(1),(2),...(ni)}$ – расход газов на

химические реакции в камере, кг/с.

На этапе нанесения покрытия объем вакуумной камеры и температура газа-реагента в ней постоянные, исходя из чего, опишем систему уравнений на основании закона Менделеева-Клапейрона (2):

$$\begin{cases} M_{(1)} = \frac{\mu_{(1)}V_k}{RT_k} \\ M_{(2)} = \frac{\mu_{(2)}V_k}{RT_k} \\ \dots \\ M_{(n_l)} = \frac{\mu_{(n_l)}V_k}{RT_k} \end{cases}$$
(2)

где: μ_{rasos} (1), μ_{rasos} — молекулярный вес газов поступающих в камеру; V_{κ} — объем вакуумной камеры, M^3 ; R — универсальная газовая постоянная (R = 8,314 Дж·г-моль/К), M^3 ; T_{κ} — температура газовой смеси в вакуумной камере, К;

Р тазов (1) — парциальное давление газов Па.

В дифференциальной форме система уравнений примет вид (3):

$$\begin{cases} \frac{dM_{(1)}}{d\tau} = \frac{\mu_{(1)}V_k}{RT_k} \cdot \frac{dP_{(1)}}{d\tau} \\ \frac{dM_{(2)}}{d\tau} = \frac{\mu_{(2)}V_k}{RT_k} \cdot \frac{dP_{(2)}}{d\tau} \\ \dots \\ \frac{dM_{(n_l)}}{d\tau} = \frac{\mu_{(n_l)}V_k}{RT_k} \cdot \frac{dP_{(n_l)}V_k}{RT_k} \\ \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений позволит получить систему дифференциальных уравнений динамики изменения давления газов в вакуумной камере в процессе нанесения покрытия, а дальнейшее преобразование данной системы уравнений по Лапласу позволят выполнить структурный синтез автоматизированной системы управления балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов - реагентов в технологии нанесения ионно-плазменных покрытий.

(3)

Дифференциальное уравнение динамики изменения объёмов для двух газов азота и углерода поступающих в вакуумную камеру в процессе нанесения покрытия в виде:

$$\begin{cases} \frac{\mu_{(C_{2})}V_{k}}{RT_{k}} \cdot \frac{dV_{(C_{2})}(\tau)}{d\tau} = -\frac{\mu_{(C_{2})}V_{R}}{RT_{k}}P_{(C_{2})}(\tau) + \\ +m_{nod(C_{2})}(\tau) - \frac{\mu_{(C_{2})}}{\mu_{Mamep}}m_{Mamep}(\tau) + \frac{\mu_{(C_{2})}H}{RT_{k}} \\ \frac{\mu_{(N_{2})}V_{k}}{RT_{k}} \cdot \frac{dV_{(N_{2})}(\tau)}{d\tau} = -\frac{\mu_{(N_{2})}V_{R}}{RT_{k}}P_{(N_{2})}(\tau) + \\ +m_{nod(N_{2})}(\tau) - \frac{\mu_{(N_{2})}}{\mu_{Mamep}}m_{Mamep}(\tau) + \frac{\mu_{(N_{2})}H}{RT_{k}} \end{cases}$$
(4)

В статическом режиме $V_{N_3} = V_{N_3, \rho}$, $V_{C_3} = V_{C_3, 0}$.

При подачи в вакуумную камеру N₂, необходимые для построения массовой коэфициенты в будут равны:

$$a_{\mathrm{L}N_2} = \frac{\mu_{\mathrm{N}_2} V_{\mathrm{E}}}{RT_{\mathrm{E}}} ; \qquad (5)$$

$$a_{2N_2} = \frac{\mu_{N_2} \nu_{\mathfrak{H}}}{RT_{\mathfrak{K}}} \tag{6}$$

$$a_{3N_{2}} = \frac{0.5\mu_{N_{2}}}{\mu_{Ti}}; \qquad (7)$$

$$a_{4N_2} = 0.79 \frac{23 \cdot 26.66 \cdot 10^{-6}}{8.314 \cdot 300} = 0.24 \cdot 10^{-6} \text{ r/c}$$
(8)

При подачи в вакуумную камеру С₂, необходимые для построения массовой модели коэфициенты будут равны:

$$a_{1C_{1}} = \frac{\mu_{C_{1}} V_{\kappa}}{RT_{\kappa}}; \qquad (9)$$

$$a_{2C_{1}} = \frac{\mu_{C_{1}}\nu_{R}}{RT_{R}}; \qquad (10)$$

$$a_{3C_{2}} = \frac{0.37\mu_{C_{2}}}{\mu_{T_{1}}} \qquad (11)$$

$$a_{4C_{1}} = 0.195 \cdot 10^{-6} \text{ r/c} \qquad (12)$$

Переходная функция зависимости выходного параметра V от управления $m_{\text{подC2}}$ и возмущения m_{Ti} будет иметь вид:

$$\begin{cases} a_{1(C_{2})} \frac{dP_{(C_{2})}(\tau)}{d\tau} = -a_{2(C_{2})}P_{(C_{2})}(\tau) + m_{nod(C_{2})}(\tau) - a_{2(C_{2})}m_{namep}(\tau) + a_{4(C_{2})} \\ a_{1(N_{2})} \frac{dP_{(N_{2})}(\tau)}{d\tau} = -a_{2(N_{2})}P_{(N_{2})}(\tau) + m_{nod(N_{2})}(\tau) - a_{3(N_{2})}m_{namep}(\tau) + a_{4(N_{2})} \end{cases}$$
(13)

Полагая в $m_{\text{подC}_3}(t) = \text{const} m_{\text{подN}_3}(t) = \text{const}_{\text{и}} m_{\text{T}i}(t) = \text{const}, a \text{ также:}$

$$A_{N_2} = \frac{a_{2N_2}}{a_{1N_2}}; \quad B_{N_2} = \frac{m_{nodN_2} - a_{3N_2}m_{TI} + a_{4N_2}}{a_{1N_2}},$$

$$A_{\alpha_1} = \frac{a_{2C_1}}{a_{1N_2}}; \quad B_{\alpha_2} = \frac{m_{nodC_1} - a_{3C_1}m_{TI} + a_{4C_1}}{a_{1N_2}},$$
(14)

$$c_1 = \frac{1}{a_1 c_1}; \quad B_{C_1} = \frac{1}{a_1 c_1}$$
 (15)

преобразуем систему линейных дифференциальных уравнений (13) к виду:

$$\begin{cases} \frac{dV_{(C_2)}(\tau)}{d\tau} + A_1 V_{(C_2)}(\tau) - B_1 = 0\\ \frac{dV_{(N_2)}(\tau)}{d\tau} + A_2 V_{(N_2)}(\tau) - B_2 = 0\\ V_{N_1}(0) = V_{N_1,0};\\ V_{C_1}(0) = V_{C_{1,0}} \end{cases}$$
(16)

Уравнение (16) имеет следующее решение [5]:

$$\begin{cases} V_{(C_2)} = \left(V_{(C_2)_0} - \frac{B_{(C_2)}}{A_{(C_2)}} \right) e^{-At} + \frac{B_{(C_2)}}{A_{(C_2)}} \\ V_{(N_2)} = \left(V_{(N_2)_0} - \frac{B_{(N_2)}}{A_{(N_2)}} \right) e^{-At} + \frac{B_{(N_2)}}{A_{(N_2)}} \end{cases}$$
(17)

Программным решением для этой стадии процесса является постоянное значение объемов поступающих в вакуумную камеру газов $V(C_1) = V(C_1), 0$, $V(N_2) = V(N_2), 0$, а программным управлением некоторое значение $m_{nodN2(np)}$, $m_{nodC2(np)}$, обеспечивающее заданное значение давления в статическом режиме.

Перейдем к отклонениям:

$$y_{C_{2}} = V_{C_{2}} - V_{(C_{2}),0}; \qquad (18)$$

$$V_{C2} = m_{no\partial C2} - m_{no\partial C2(np)}; \qquad (19)$$

$$y_{N_{2}} = V_{N_{2}} - V_{(N_{2}),0}; \qquad (20)$$

$$v_{2} = m_{no\partial N2} - m_{no\partial N2(np)} \qquad (21)$$

(22)

В статическом режиме выполняется соотношение:

$$\begin{aligned} & \left[0 = -a_{2(\mathcal{C}_{1})}V_{(\mathcal{C}_{1})}(\tau) + m_{\text{max}_{\mathcal{C}_{1}}}(\tau) + a_{4(\mathcal{C}_{1})} \right] \\ & 0 = -a_{2(\mathcal{N}_{1})}V_{(\mathcal{N}_{1})}(\tau) + m_{\text{max}_{\mathcal{N}_{1}}}(\tau) + a_{4(\mathcal{N}_{1})} \end{aligned}$$

Преобразуя данное выражение, получим (23):

$$a_{1(C_{2})} \frac{d^{y}(C_{2})}{dt} = -a_{2(C_{2})}^{y}(C_{2}) - a_{2(C_{2})}^{p}P_{(C_{2}),p} + + \nu_{(C_{2})} + m_{\text{top}\pi_{1}(C_{2})(\text{tp})} - a_{2(C_{2})}m_{\text{T}}f_{\star}(t) + a_{4(C_{2})} a_{1(N_{2})} \frac{d^{y}(N_{2})}{dt} = -a_{2(N_{2})}^{y}\nu_{(N_{2})} - a_{2(N_{2})}^{y}P_{(N_{2}),p} + + \nu_{(N_{2})} + m_{\text{top}\pi_{1}(N_{2})(\text{tp})} - a_{3(N_{2})}m_{\text{T}}f_{\star}(t) + a_{4(N_{2})}$$
(23)

Уравнение в отклонениях принимает вид:

$$\begin{cases} a_{1(C_{2})} \frac{d\nu(C_{2})}{d\tau} = -a_{2(C_{2})}\nu(C_{2}) + \nu(C_{2}) - a_{3(C_{2})}m_{\text{Ti}}(\tau) \\ a_{1(N_{2})} \frac{d\nu(N_{2})}{d\tau} = -a_{2(N_{2})}\nu(N_{2}) + \nu(N_{2}) - a_{3(2)}m_{\text{Ti}}(\tau) \end{cases}$$
(24)

Построим переходную функцию зависимости выходных параметров V_{C2} и V_{N2} от управления $m_{\Pi 0 d N2}$ и $m_{\Pi 0 d C2}$ и возмущения m_{Ti} . После преобразования по Лапласу [5] уравнение (24) приобретает вид:

$$\begin{cases} Y(s)_{(C_{1})} - U(s)_{(C_{1})} \frac{1}{(a_{(C_{1})}s + a_{2(C_{1})})} - \\ -\mathcal{Q}(s)_{(C_{1})} \frac{a_{3(C_{1})}}{(a_{(C_{1})}s + a_{2(C_{1})})} \\ Y(s)_{(N_{1})} - U(s)_{(N_{1})} \frac{1}{(a_{(C_{1})}s + a_{2(N_{1})})} - \\ -\mathcal{Q}(s)_{(N_{1})} \frac{a_{3(N_{1})}}{(a_{(N_{1})}s + a_{2(N_{1})})} \end{cases}$$
(25)

В итоге передаточная функция по управлению для двух газов будет иметь вид:

$$\frac{Y(s)_{N_1}}{U(s)_{N_2}} = \frac{1}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})};$$

$$\frac{Y(s)_{C_1}}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})} = \frac{1}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})};$$
(26)

$$\frac{U(s)_{C_1}}{(a_{1C_1}s + a_{2C_1})}, \qquad (27)$$

а по возмущению – вид для двух газов:

$$\frac{Y(s)_{C_2}}{Q(s)_{C_2}} = \frac{a_{3C_2}}{(a_{1C_2}s + a_{2C_2})};$$
(28)

$$\frac{\gamma(s)_{N_2}}{\rho(s)_{N_2}} = \frac{a_{3N_2}}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})}$$
(29)



Рис. 1 – Структурная схема управления процессом напуска газов - реагентов в вакуумную камеру

В результате проведенной работы было выполнено:

1. Выбраны и обоснованы критерии оценивания параметров подачи газов - реагентов в технологии КИБ;

 На примере подачи в вакуумную камеру двух газов - реагентов предложена математическая модель процесса нанесения покрытий на основе описания массового баланса для подачи нескольких газов в вакуумную камеру;

3. Выполнен структурный синтез автоматизированной системы управления балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов – реагентов в технологии нанесения ионно-плазменных покрытий.

Целью дальнейшей работы является разработка схемы управления одновременной подачей двух и более газов при нанесении композиционных ионно-плазменных покрытий на режущий инструмент, аппаратное обеспечение такого управления, а также практическая реализация и внедрение предложенных решений.

Список литературы: 1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущий инструмент с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 191 с. 2. Аникеев А.И., Аникин В.Н., Торопченов В.С. Пути повышения работоспособности режущего инструмента за счет нанесения износостойких покрытий // Современный твердосплавный инструмент и рациональное его использование. – Л.: ЛДНТП, 1980. – С. 40 – 44. **3.** Тонконогий В.М. Управление подачей газа-реагента при нанесении ионно-плазменных покрытий с прогнозированием негерметичности вакуумных установок // Холодильная техника и технология. – 2004. – № 3(89). – С. 70 –73. **4.** Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1995. – Т. 1, 2. **5.** Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 467 с.

Р. С. Турманидзе, д-р техн. наук, Д. С. Буцхрикидзе, канд. техн. наук, М. Д. Беридзе, Тбилиси, Грузия

ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ КРИСТАЛЛА САПФИРА МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СХЕМА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Розглянуто питання, пов'язані з визначенням ступеня впливу оріснтації кристала сапфіра на його оброблюваність при алмазному шліфуванні торцем круга і розробці перспективної, оригінальної схеми формоутворення неповної сферичної поверхні, зокрема, сапфірової голівки, ендопротезуа тазостегнового суглоба людини.

Головки эндопротеза тазобедренного сустава человека, с точки зрения характера и величины нагрузки, эксплуатируются в экстремальных условиях. Поэтому в каждом конкретном случае подбор необходимого материала с соответствующими физико-механическими характеристиками, а также повышение точности и качества обработки самой значительной части эндопротеза – сферических поверхностей - является весьма актуальной задачей, острота которой в последние годы интенсивно возрастает. Это обусловлено тем, что если раньше необходимость подобных операций была вызвана возрастным фактором человека или травматологическими переломами, то в последнее двадцатилетие резко увеличилось количество больных в молодом возрасте 30-40 лет как мужчин, так и женщин, без всяких травм и переломов. По мнению медиков, основными причинами этого явления являются неактивный образ жизни молодежи, состав современных искусственных пищевых продуктов и нарушение обмена веществ. Все вышеуказанные причины определяют количество используемых эндопротезов - несколько десятков миллионов штук в год и статистика показывает, что, к сожалению, это количество ежегодно увеличивается.

Медицинская практика доказывает, что повторное протезирование тазобедренного сустава человека связано с большими проблемами. Во многих случаях осуществление таких операций становится практически невозможным. Поэтому срок службы эндопротеза тазобедренного сустава до конца жизни для больного, особенно в молодом возрасте, имеет исключительно важное значение.

Этим обстоятельством объясняется тот факт, что в таких ведущих странах мира, как США, Германия, Англия, Япония, Франция и др., ведутся широкомасштабные научно-исследовательские работы по разработке оптимальных схем формообразования, характеристик абразивного инструмента для финишных операций и технологического процесса в целом, для изготовления сферических головок эндопротеза из разных материалов с минимальной погрешностью формы и с высокими показателями качества поверхности.

На сегодняшний день в мировой практике эти головки изготовляются из различных сплавов, композиционных материалов и керамики, которые, в основном, являются изотропными материалами. Поэтому данные вышеупомянутых работ не дают необходимой информации по обработке анизотропных материалов, в частности, искусственного кристалла сапфира.

Наиболее биосовместимым с человеческим организмом, износостойким и долговечным материалом для изготовления вышеупомянутого изделия является искусственный монокристалл сапфира.

Целью представленной работы являются: определение степени влияния ориентации кристалла сапфира на его обрабатываемость и разработка перспективной, оригинальной схемы формообразования неполной сферической поверхности, в частности, сапфировой головки эндопротеза тазобедренного сустава человека.

Для проведения исследований обрабатываемости кристалла сапфира был выбран способ низкотемпературного прецизионного шлифования (НПШ), разработанный на кафедре «Технология машиностроения» Грузинского технического университета, как вариант прогрессивных способов алмазного шлифования твердых и хрупких, неметаллических материалов.

На рис.1а - обрабатываемые детали, установленные на кассете в сепараторах или другим способом крепления, например, приклеиванием, совершают вращательное движение с угловой скоростью ω2, а шлифовальный круг – со скоростью ω1 в том же направлении. В зоне резания осуществляется прижим усилием Р обрабатываемых поверхностей деталей к рабочей поверхности шлифовального круга.



Рис. 1 – а - Схема НПШ: 1- шлифовальный круг, 2- кассета с деталями, б- лабораторная установка для НПШ.

Скорость резания определяется в пределах площади контакта как среднее значение скорости относительного

перемещения рабочей поверхности инструмента по обрабатываемой поверхности детали:

$$V_{pea} = \frac{1}{F_{g}} \int_{F} V dF,$$

где Fg – площадь обрабатываемой поверхности детали – площадь контакта.

Исследования влияния ориентации кристалла сапфира на обрабатываемость материала проводились на образцах сапфира с ориентацией (0001), (1010) и (1012). Размеры образцов: 10x10x6 мм и Ф 10x6 мм.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, оснащенной специальной прецизионной головкой (рис.1.б). Применялись алмазные круги зернистостью 14/10 и 28/20 на керамической, металлической и органической связках, формы 6А2.

Выходными параметрами процесса являлись: производительность обработки, линейный минутный съем материала – q, мкм/мин; высота неровностей шероховатости поверхности – R_z, мкм; относительная опорная длина профиля на уровне 03 – t_{P03},%; подрельефный нарушенный слой – H, мкм.

Факторы процесса: скорость резания – V, м/с; давление в зоне резания Р, кПа и характеристики алмазного инструмента: зернистость – d₃, мкм; связка концентрации – K,%.

Эксперименты проводились при следующих условиях: диапазон скорости резания– V=1...12 м/с; давление в зоне резания – P=100...1500 кПа. Охлаждающая жидкость– отфильтрованная проточная вода.

По анализу данных проведенных нами комплексных, всесторонних экспериментальных исследований можно сделать следующее заключение:

Характер влияния факторов процесса на выходные параметры для выбранных ориентаций кристалла сапфира ((0001), (1010), (1012)) - постоянный.

При прочих равных условиях обработки наиболее труднообрабатываемой является ориентация (0001). Для всех испытуемых алмазных кругов соотношение значений линейного съема материала – q находится в пределах

 $q_{0001} / q_{1010} = 0,25...0,5,$

при этом,

$q_{1012}/q_{1010} = 0,75 \dots 1.$

Производительность обработки растет в диапазоне скорости резания V=1...6 м/с, тогда как, при дальнейшем увеличении скорости резания, до

12 м/с – остается постоянной.

С увеличением усилия прижима Р, во всем исследуемом диапазоне, производительность обработки растет, однако в интервале

Р =1000...1500 кПа, рост производительности значительно снижается.

Из характеристик алмазного инструмента на производительность превалирующим образом влияют зернистость и связка алмазного инструмента. Влияние концентрации незначительно. С увеличением размера зерна в пределах d₃=14/10...28/20, производительность растет в 1,5...2.5 раза. Максимальную производительность обработки обеспечивает инструмент на керамической связке ({0001}- 130 мкм/мин; {1010}- 300 мкм/мин; {1012}- 250 мкм/мин), далее на металлической ({0001}- 50 мкм/мин; {1010}- 200 мкм/мин; {1012}- 170 мкм/мин) и органической ({0001}- 30 мкм/мин; {1010}- 120 мкм/мин; {1012}- 110 мкм/мин). Инструмент на керамической связке работает в режиме самозатачивания.

Из характеристик алмазного инструмента на качество поверхности превалирующим образом влияют зернистость и материал связки инструмента. С увеличением зерна, в исследуемом диапазоне, высота неровностей R_z растет в пределах 1...1,5 класса, а глубина нарушенного слоя H – в 1,5...2 раза. При прочих равных условиях обработки на ориентации (0001) достигается более высокое качество поверхности, чем на остальных двух. Разница в 1...1,5 классах шероховатости. По этому показателю наилучшие результаты показывают алмазные круги на органической связке. Так, например, на алмазных кругах, на связках BC-11 и органическая специальная, получены следующие результаты: $R_z=0,25$ мкм; $t_{P03}=35...45\%$; H=2...5 мкм. При этом, значение параметра Rz на порядок ниже, параметра t_{P03} – в 1,5 раза выше и параметра H – в 3...5 раза меньше, чем значения соответствующих параметров, которые получены на алмазных кругах на керамической связках.





Изучением морфологии обработанной поверхности доказана возможность резания материала сапфира пластическим деформированием снимаемого слоя на низких скоростях резания V=1...3 м/с, с наименьшей глубиной нарушенного подрельефного слоя (фиг.2).

Известно, что обработка стеклообразных материалов, в частности, кристалла сапфира, путем пластического
деформирования снимаемого слоя, вместо хрупкого разрушения – диспергирования, залог получения обработанной поверхности практически без наследственных дефектов – без нарушенного подрельефного слоя. Величина Н оказалась наименьшей именно на этих образцах сапфира. Полученный значимый результат требует отдельных исследований, проведение которых планируется.

Разработка нового, или усовершенствование существующего технологического процесса механической обработки сапфировой головки ставит актуальную задачу создания новых, высокоэффективных схем формообразования. Критерии оптимизации технологических операций, такие как производительность, показатели качества поверхности и точность обработки, определяют место новых схем-способов формообразования в технологическом процессе с учетом их преимуществ.

Применяемые на сегодняшний день способы абразивной обработки неполной сферической поверхности изделий широкого назначения, как отдельные операции технологического процесса механической обработки неполной сферы, можно разделить на две группы: шлифование абразивными - алмазными кругами, доводка свободным абразивом.

Для разработки теоретической схемы алмазной обработки сапфировых сфер с учетом многолетнего опыта работы в области исследования обрабатываемости сверхтвердых хрупких, неметаллических материалов абразивными – алмазными кругами, были рассмотрены и проанализированы известные схемы формообразования неполной сферической поверхности связанными абразивом.



Рис. 3 – Схема формообразования неполной сферической поверхности торцевым алмазным кругом с двойным вращением детали: 1 – алмазный шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь – неполная сфера.



Рис. 4 – Сапфировая сферическая головка: гШ – радиус сферы; γ – угол сегмента сферической поверхности.

В качестве аналога варианта теоретической схемы алмазной обработки сапфировой неполной сферы был выбран, найболее близкий к нему по кинематике, способ шлифования неполной сферы торцом круга с двойным вращением детали с угловыми скоростями ω_2 и ω_3 (фиг. 3).

Нами были разработаны несколько вариантов теоретических схем формообразования неполной сферической поверхности. Один вариант оригинальной кинематической схемы формообразования неполной сферической поверхности сапфировой головки (фиг. 4) торцовым шлифовальным кругом представлен на фиг.5. Режущим инструментом служит специальный, комбинированный торцовый шлифовальный круг с двумя концентричными алмазоносными слоями, с режущими поверхностями в виде внутреннего, в точке А, и наружного, в точке В, отсеченных конусов.

Шлифовальный круг совершает вращательное движение с угловой скоростью ω₁. Обрабатываемая деталь - шар - совершает двойное вращательное движение с угловыми скоростями ω₂ вокруг собственной оси 4 и ω₃ вокруг оси 3, которая является осью шпинделя детали. Направление угловых скоростей ω₁, ω₂ и ω₃ одинаковое. Обрабатываемая деталь 2 прижимается к режущей поверхности шлифовального круга в двух точках A и B подпружиненным усилием P. При этом режущие поверхности шлифовального круга в осевом сечении (плоскость чертежа) образуют угол β, бисектриса которого проходит через центр 0 –обрабатываемой сферы.

Отличительные признаки теоретической схемы от аналога такие, как форма рабочей поверхности инструмента и форма контакта обрабатываемой поверхности детали с режущей поверхностью шлифовального круга.

Для создания равных условий обработки в двух точках A и B, необходимо соблюдать равенство как скоростей, так и усилий резания.

Скорость резания. Равенство условий обработки по скорости резания означает равенство максимальных значений скоростей резания и идентичность их законов изменения в цикле в двух зонах резания.

Скорости резания при шлифовании неполной сферы по предложенной схеме в точках А и_В даются на фиг.5 в, с, и d.

Результирующая скорость резания v_{PA}- в точке А

V.

÷.

$$\mathbf{v}_{\mathbf{p}\underline{A}} = \sqrt{\mathbf{v}_{\mathbf{h}}^{2} + \mathbf{v}_{\mathbf{m}\underline{A}}^{2} - 2\mathbf{v}_{\mathbf{h}} \cdot \mathbf{v}_{\mathbf{m}\underline{A}} \cdot \cos\delta_{1}} , \qquad (1)$$

$$= v_{\mathbf{K}\mathbf{k}} - v_{\mathbf{0}} = R_{\mathbf{K}\mathbf{k}} \cdot \omega_{\mathbf{l}} - r_{\mathbf{m}} \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_{\mathbf{l}}$$
(3)

$$\nabla \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{A} = \mathbf{f}_{\mathbf{i} \mathbf{A}} \cdot \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{i}} \tag{4}$$

И





Рис.5 – Кинематическая схема формообразования неполной сферической поверхности торцовым шлифованием: 1 – торцовый шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь – неполная сфера; 3 – ось вращения шпинделя детали; 4 – ось вращения детали.

b)

Аналогично точке А, в точке В результирующая_скорость резания равна

$$\mathbf{v}_{\mathbf{B}} = \mathbf{v}_{\mathbf{B}} - \mathbf{v}_{\mathbf{m}B},$$
(5)
$$\mathbf{v}_{\mathbf{B}} = \sqrt{\mathbf{v}_{\mathbf{B}}^{2} + \mathbf{v}_{\mathbf{m}B}^{2} - 2 \mathbf{v}_{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{v}_{\mathbf{m}B} \cdot \cos\delta_{2}},$$
(6)

где

$$\mathbf{v}_{\mathbf{B}} = \mathbf{v}_{\mathbf{E}\mathbf{B}} - \mathbf{v}_{\bullet} = (\mathbf{R}_{\mathbf{E}\mathbf{A}} - 2\mathbf{r}_{\mathbf{m}} \cdot \sin\frac{\gamma}{4}) \cdot \boldsymbol{\omega}_{1} + \mathbf{r}_{\mathbf{m}} \cdot \sin\frac{\gamma}{4} \cdot \boldsymbol{\omega}_{1}$$
(7)
$$\mathbf{v}_{\mathbf{H}\mathbf{B}} = \mathbf{r}_{i\mathbf{B}} \cdot \boldsymbol{\omega}_{1}$$
(8)

И

Линейная скорость детали от вращательного движения с угловой скоростью ω₂

$$\mathbf{v}_{\mathbf{III}\,\mathbf{i}} = \mathbf{r}_{\mathbf{i}} \cdot \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{3}} = \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{3}} \mathbf{r}_{\mathbf{III}} \cdot \cos \varphi = \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{3}} \cdot \mathbf{r}_{\mathbf{u}} \sqrt{\sin^{2} \frac{\gamma}{4} \cdot \cos^{2} \alpha + \frac{1}{4} \cdot \sin^{2} \frac{\gamma}{2} (1 + \sin \alpha)^{2}},$$

где ^{*φ*} - угол наклона оси 4 относительно образующей рабочей поверхности круга в осевом сечении, *α* – угол поворота оси 4 относительно оси 3 с угловой скоростью ^{*α*}.

(9)

(10)

Текущий радиус ${}^{t_{1}}$ точки поверхности детали, при повороте оси 4 вокруг оси 3 на 180^{0} , меняется в пределах $0 \le t_{1} \le t_{m}$. Таким образом, для полного описания сферической поверхности в течение одного цикла достаточен один оборот детали вокруг оси 4, при повороте оси 4 относительно оси 3 на половину оборота, т.е. на 180^{0} . Следовательно, в этих условиях обрабатываемая сферическая поверхность детали в течение одного цикла описывается дважды, т.е. по одному разу в каждой зоне обработки.

Исходя из вышесказанного, между угловыми скоростями ω_2 и ω_3 имеем зависимость

$$v_{\mathbf{P}_{A}}$$
 достигает максимума при $\alpha = \pi \frac{3}{2}$, и, следовательно, $\delta_1 = \frac{\pi}{2}$.

 $\omega_2 = 2 \omega_3$.

$$\mathbf{v}_{\mathbf{p}_{A \max}} = \mathbf{v}_{\mathbf{A}} = \mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{A}} \cdot \boldsymbol{\omega}_{1} - \mathbf{r}_{\mathbf{m}} \cdot \sin\frac{\gamma}{4} \boldsymbol{\omega}_{1}$$
(11)

 $v_{\mathbf{B}}$ достигает максимума при $\alpha = \frac{\pi}{2}$, и, следовательно, $\delta_2 = \pi$.

$$v_{\mathbf{R}} = \mathbf{R}_{\mathbf{R}} \cdot \omega_{\mathbf{l}} - 2r_{\mathbf{m}} \sin \frac{\gamma}{4} \omega_{\mathbf{l}} + r_{\mathbf{m}} \cdot \sin \frac{\gamma}{4} \cdot \omega_{\mathbf{l}} + r_{\mathbf{m}} \sin \frac{\gamma}{2} \omega_{\mathbf{l}}.$$
 (12)

При условии ^v Amax ^{= v} Bmax ⁱ по выражениям (10), (11) и (12) определяется отношение угловых скоростей ^ω и ω₁

$$\frac{\omega_1}{\omega_1} = \frac{1}{1 + 2\cos\frac{\gamma}{4}}$$
(13)

Таким образом, по предложенной схеме формообразования неполной сферической поверхности для достижения

равенства условий обработки по скорости резания надо соблюдать отношения угловых скоростей ω_1 , ω_2 и ω_3 , по выражениям (10) и (13).

Усилие прижима. Равенство условий в двух точках по усилию прижима достигается расположением обрабатываемой детали по отношению шлифовального круга. Подпружиненное усилие Р проходит через центр О сферы и совпадает с биссектрисой угла β и таким образом проходит на равных расстояниях от двух A и B зон обработки. В каждой зоне создаются равные усилия по P/2, которые в свою очередь слагаются из двух составляющих, нормальную $P_{\rm N}$ и тангенциальную P_{τ} (на фигуре не показаны). При этом:

$$P_{\mathbf{W}} = \frac{P}{2} \cdot \cos \frac{\gamma}{4} , \quad P_{\mathcal{T}} = \frac{P}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{4} .$$

Несмотря на некоторое кинематическое сходство новой схемы формообразования с аналогом, явными отличительными признаками являются, такие, как форма рабочей поверхности инструмента в виде двух самостоятельных режущих поверхностей и исходя из этого, форма контакта обрабатываемой поверхности сферы с инструментом, а именно образование двух идентичных зон резания. Как было показано выше, идентичность двух зон резания – контакта реализована равенством условий обработки в в обеих зонах как по результирующей скорости резания, так и по усилию прижима. Исходя из вышесказанного следует логическое заключение, что новая схема формообразования позволит значительного повышения производительности шлифования.

Предполагается, что разработанный оригинальный способ который находится в процессе патентования взамен традиционных методов алмазного шлифования, которые применяются на сегодняшний день в технологическом процессе механической обработки сапфировой головки, может быть успешно применен на предварительной стадии обработки с обеспечением значительного повышения производительности обработки. Также при оптимизации процесса по таким критериям, как качество обработанной поверхности и точность формы изделия, способ может быть применен на окончательной стадии обработки, до финишной операции, с обеспечением значительного повышения показателей качества поверхности и точности обработки, тем самым также значительного уменьшения операционногой припуска, в результате времени и себестоимости обработки на финишных операциях (переходах).

Таким образом, на наш взгляд, предложенный способ может быть вполне конкурентоспособным на предварительных операциях, вплоть до финишной обработки, в технологическом процессе механической обработки сапфировой головки.

В работе представленные материалы получены в рамках международного проекта, который был организован по линии Украинского научно-технологического центра, исполнителями которого являются Грузинский технический университет (Тбилиси), Институт сверхтвердых материалов Национальной академии наук Украины (Киев) и Институт монокристаллов Национальной академии наук Украины (Харьков).

Участниками проекта были решены отдельные научные задачи, в частности: Грузинским техническим университетом исследовано влияние анизотропии кристалла сапфира на обрабатываемость материала при шлифовании; разработаны перспективные, теоретические схемы формообразования неполной сферической поверхности. Институтом сверхтвердых материалов была исследована связь коэффициента трения с кристаллографическими особенностями сапфира и режимами отжига; обрабатываемость материалов, обладающих анизотропией свойств, в частности сапфира, по традиционной технологии для оценки влияния анизотропии на точность формообразования сферической поверхности; разработаны рекомендации применительно к процессу алмазной доводки головок эндопротезов тазобедренного сустава из искусственного монокристалла сапфира. Харьковским институтом монокристаллов были определены режимы выращивания, обеспечивающие максимальную очистку материала сапфира; получен сапфир в кристаллографическом направлении- имеющий минимальную анизотропию.

Результаты проведенных исследований в рамках вышеупомянутого проекта, по нашей оценке, представляют собой хорошую базу данных для перспективных разработок. А именно, участниками проекта в УНТЦ был представлен новый проект под названием «Развитие методов упрочнения сапфира, применяемого в медицине». В рамках этого проекта планируется проведение работ по разработке комплексного метода упрочнения сапфира для изготовления изделий, эксплуатирующихся при высоких механических нагрузках - в экстремальных условиях, а также, конкурентоспособных технологических процессов изготовления сапфировых эталонов для определения физикомеханических свойств нового материала, и оригинального технологического процесса изготовления сапфировых изделий медицинского назначения.

По долгосрочной программе предусмотрена организация европроекта с созданием необходимого оборудования, инструментов, технологической оснастки и всего технологического процесса изготовления высокоточных сферических поверхностей из сапфира повышенной прочности или других подходящих по своим свойствам материалов.

Список литературы: 1. Batiashvili B.I., Butskhrikidze D.S., Mamulashvili G.L., Mgaloblishvili O. B., Turmanidze R.S., Kromp K., Mills B., Steinkellner W., Schafler E., Rösel F. G., Peterlik H.. Evaluation of surface preparation techniques, SFG: Swing Frame Grinding and LPG: Low Temperature Precision Grinding, by comparison of results on alumni and siliconcarbide model materials. FRACTOGRAPHY OF ADVANCED CERAMICS. International Conference Stará Lesná, High Tatras, May 2001. 2. Batiashvili B.L., Butskhrikidze D.S., Mamulashvili G.A, Turmanidze R.S., Kromp K., Mills B., Mgaloblishvili O. Technological Possibilities of Low Temperature Precision Grinding Process when Machining Hard and Brittle Materials. FRACTOGRAPHY OF ADVANCED CERAMICS, International Conference, Stará Lesná, High Tatras, May 2001. 3. Turmanidze R.S., Burtskhrikidze D.S., Kromp K., Mills B., "Low temperature precision grinding of the process of abrasive machining, Kiev 2002, 490-499 pp. 4. Turmanidze R.S., Butskhrikidze D.S., Mamulashvili G.L., Kromp K., Mills B., Morgan M., Mgaloblishvili O. Low-temperature precision grinding of hard and brittle materials and Outlook of its development and application. Proceedings of 19th NCMR Conference. Glasgow, September 2003. Міністерство освіти і науки України Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Ministry of Education & Science of Ukraine National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ НІGH TECHOLOGIES OF MACHINE-BUILDING

Збірник наукових праць HTV «ХПІ» Printed scientific works NTU «KhPI»

> Харків – 2009 Kharkiv – 2009

Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ "ХПІ". – Харків, 2009. – Вип.2 (19). – 212 с.

Державне видання Свідоцтво Державного комітету телебачення і радіомовлення України КВ № 7839 від 8 вересня 2003 року

В збірнику представлені наукові праці, які присвячені вирішенню проблем в області високих технологій машинобудування. Розглянуті питання екологічно безпечного виробництва, сучасного інструментального забезпечення, використання 3D моделювання для конструювання інструментальних та робочих поверхонь, контролю поверхонь, які отримані за допомогою нанотехнологій, технологій мінімізації подання 3OTC та ін. Для фахівців в області машинобудування, науково-технічних працівників і студентів.

В сборнике представлены научные труды, которые посвящены решению проблем в области высоких технологий машиностроения. Рассматриваются вопросы экологически безопасного производства, современного инструментального оснащения, применения 3D моделирования для конструирования инструментальных и рабочих поверхностей, контроля поверхностей, полученных с помощью нанотехнологий, минимизации СОТС и др.

Для специалистов в области машиностроения, научно-технических работников и студентов.

The scientific works are shown In the accumulator, which one are dedicated to solution of problems in the field of high technologies of machine-building. The problems of ecological secure production, modern tool equipment, application 3D of simulation for constructing tool and working surfaces, monitoring of surfaces obtained by nanotechnologies, minimization of supply coolant etc. are considered. For specialists from machine-building field, scientists, technologists and students.

Im Sammelband sind die wissenschaftliche Werke im Gebiet Hochtechnologien im Maschinenbau zusammengestellt. Neue Frage der Werkzeugausrüstung Hochtechnologien, der 3D-Imitation Werkzeug- und Arbeitsoberflächen, der Präzisionsbearbeitung, der Prüfung Superpräzisionsoberflächen von optischen Teilen, der Minimierung des Verbrauchs Schneidflüssigkeiten usw. sind behandelt. Für die Fachleute in der Branche Maschinenbau, für die wissenschaftlichen Mitarbeiter und Studenten.

Редакційна колегія: Верезуб М.В., д.т.н. (відповідальний редактор), Пупань Л.І. (зам. відповідального редактора), Доброскок В.Л., д.т.н., Залога В.О., д.т.н., Зубар В.П., проф., Мовшович О.Я., д.т.н, Пермяков О.А., д.т.н., Тимофесь Ю.В. д.т.н., Турманідзе Р.С., д.т.н., Узунян М.Д., д.т.н., Фадесь В.А., проф., Федорович В.О., д.т.н., Склярова О.В. (відповідальний секретар).

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» 2009

Наукове видання

Високі технології в машинобудуванні

Збірник наукових праць НТУ «ХПІ»

Упорядник

Оригінал-макет

проф. Грабченко А.І. Склярова О.В.

Підп. до друку 15.09.2009 р. Формат 60х84 1/16. Папір Сору Рарег. Друк - ризографія. Гарнитура Таймс. Умов.друк.арк. 10,0. Облік.вид.арк. 11,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХШ» Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р. 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21