

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ НА УСЛОВИЯ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Доктора техн. наук, профессора *ФЕЛЬДШТЕЙН Е. Э.<sup>1)</sup>*, *МАРУДА Р.<sup>1)</sup>*,  
канд. техн. наук, доц. *КОРНИЕВИЧ М. А.<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Зеленогурский университет, Польша,

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет

E-mail: koles\_@tut.by

В статье рассмотрено влияние способа охлаждения зоны резания на форму и коэффициент утолщения стружки при точении стали R35 твердостью 1250 МПа. Исследовали резание при охлаждении всухую, сжатым воздухом и эмульсионным туманом. В качестве активной субстанции использовали эмульсол OPORTET RG-2, концентрация эмульсии – 4 %. Режущий инструмент – токарный резец со сменной квадратной пластиной SNUN120408 из твердого сплава P25 с многослойным износостойким покрытием, верхний слой – нитрид титана, передняя поверхность пластины – плоская. Диапазон скоростей резания – 80–450 м/мин, подач – 0,1–0,5 мм/об, расходов эмульсии – 1,5–3,5 г/мин и сжатого воздуха – 4,5–7,0 м<sup>3</sup>/ч. Глубина резания – 1,0 мм. Для сокращения количества единичных исследований можно использовать планы, базирующиеся на ЛП<sub>т</sub>-последовательностях.

Показано, что способ охлаждения зоны резания оказывает существенное влияние на условия стружкообразования. Получено уравнение регрессии, описывающее влияние условий обработки на коэффициент утолщения стружки  $K_a$ .

При охлаждении эмульсионным туманом расширяется диапазон режимов резания, при которых формируется стружка в виде коротких фрагментов спирали или элементная. Благоприятная форма стружки обеспечивается при расходе эмульсии не более чем 2 г/мин. В результате исследований определены условия охлаждения эмульсионным туманом, при которых наблюдаются наименьшие значения коэффициента утолщения стружки и форма стружки, обеспечивающая ее легкое удаление из зоны резания. При точении всухую значения  $K_a$  больше не менее чем на 15 % по сравнению с другими способами охлаждения зоны резания.

**Ключевые слова:** охлаждение зоны резания, смазочно-охлаждающая жидкость, стружкообразование.

Ил. 4. Табл. 1. Библогр.: 14 назв.

## INFLUENCE OF CUTTING ZONE COOLING METHOD ON CHIP FORMING CONDITIONS

*FELDSHTEIN E. E.<sup>1)</sup>*, *MARUDA R.<sup>1)</sup>*, *KORNIIEVICH M. A.<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Politechnika Zielonogórska, Polska,

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University

The paper considers an influence of a cutting zone cooling method on the chip shape and thickening ratio while turning R35 steel with the hardness of HB 1250 MPa. Cutting with various types of cooling – dry, compressed air and emulsion fog has been investigated in the paper. OPORTET RG-2 emulsol with emulsion concentration of 4% has been used as an active substation. Cutting tool is a turning cutter with a changeable square plate SNUN120408 made of P25 hard alloy with multilayer wear-resistant coating, upper titanium nitride layer. Front plate surface is flat. Range of cutting speeds – 80–450 m/min, motions – 0,1–0,5 mm/rev, emulsion flow – 1,5–3,5 g/min and compressed air – 4,5–7,0 m<sup>3</sup>/h, cutting depth – 1,0 mm. In order to reduce a number of single investigations it is possible to use plans based on ЛП<sub>т</sub>-sequences.

It has been shown that the method for cutting zone cooling exerts significant influence on conditions for chip formation. Regression equation describing influence of machining conditions on  $K_a$ -chip thickening ratio has been obtained in the paper. The range of cutting modes is extended while using emulsion fog for cooling. In the process of these modes chip is formed in the shape of short spiral fragments or elements. Favourable form of chips is ensured while using the following rate of emulsion – not more than 2 g/min. The investigations have made it possible to determine conditions required for cooling emulsion fog. In this case it has been observed minimum values in chip thickening ratio and chip shape that ensures its easy removal from cutting zone. While making dry turning values of  $K_a$  is higher not less than 15 % in comparison with other methods for cutting zone cooling.

**Keywords:** cutting zone cooling, cooling-lubricant medium, chip shaping.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 14 titles.

**Введение.** Использование смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) при обработке резанием позволяет повысить период стойкости режущего инструмента, улучшить условия стружкообразования и свойства поверхностного слоя, снизить силы резания и т. д. В настоящее время имеет место тенденция сокращения использования СОЖ, что связано как с технологическими, так и с экологическими факторами, в том числе с все более жесткими международными нормами по охране окружающей среды [1, 2].

Согласно данным [1–3], в автомобильной промышленности Германии стоимость использования СОЖ (доставка, непосредственное использование, восстановление и утилизация) достигает от 7,5 до 17,0 % общих производственных затрат, тогда как стоимость режущих инструментов менее 4,0 % от затрат. В 1990-е гг. в Германии утилизировали 750000 т СОЖ, причем стоимость утилизации 1 т достигала 1500 DM и постоянно росла.

Среди экологических факторов следует выделить существенное влияние СОЖ на здоровье производственного персонала. В результате ее использования возрастает вероятность дерматологических (до 30 % всех профессиональных заболеваний [2]), аллергических, онкологических заболеваний, вызванных воздействием на организм канцерогенных соединений.

Исключить вредное воздействие СОЖ можно в случае резания всухую либо с минимальным расходом технологической среды. Первое направление успешно развивается в условиях сверхскоростной обработки при использовании инструментов с многослойными износостойкими покрытиями или из сверхтвердых материалов [2–4]. В случае, когда «чистого» резания всухую реализовать не удастся, возможной альтернативой является минимализация условий смазывания и охлаждения зоны резания, т. е. введение в эту зону как можно меньшего количества СОЖ при обеспечении желаемых результатов. Расход СОЖ в данном случае менее 50 г/ч [5]. В этих условиях инструмент, деталь и стружка остаются практически сухими. Активные составляющие технологической среды транспортируются в зону резания в струе сжатого воздуха (так называемый масляный или эмульсионный туман). Такая обработка как

минимум не снижает периодов стойкости режущего инструмента [6], поскольку обеспечивает лучшие условия смазывания и охлаждения контактных поверхностей «лезвие – стружка – обрабатываемая деталь». В отличие от охлаждения струей СОЖ, вода (основная составляющая эмульсии) активнее испаряется при охлаждении струей тумана, поскольку микрокапли эмульсии, имея высокое отношение площади поверхности к массе, характеризуются высокой активностью поверхности. Исследования условий работы вращающихся инструментов показали, что при частотах вращения более 4000 мин<sup>-1</sup> капли струи жидкости отбрасываются от поверхности инструмента под действием центробежных сил, тогда как микрокапли тумана при частотах до 25000 мин<sup>-1</sup> гарантированно оседают и остаются на поверхности инструмента [7].

Присутствие на поверхностях контакта активных составляющих, входящих в состав микрокапель эмульсии, может изменять основные показатели процесса резания – условия стружкообразования, сопротивление резанию, условия теплообмена и т. д.

**Условия исследований.** Исследовали условия образования стружки при точении низкоуглеродистой (0,07–0,16 % С) стали R35 PN-89/H-84023/07. Данная сталь имеет повышенные механические характеристики: твердость 125 HB, временное сопротивление  $\sigma_b = 350$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 235$  МПа, относительное удлинение  $\varepsilon = 25$  %. Структура стали ферритно-перлитная. Режущий инструмент – токарный резец со сменной квадратной пластиной SNUN120408 из твердого сплава P25 с многослойным износостойким покрытием, верхний слой – нитрид титана. Главный угол резца в плане 70°, главный передний угол 8°. Плоская передняя поверхность пластины позволила исключить влияние стружкозавивающих и стружколомающих канавок на процесс стружкообразования.

Исследовали изменения условий резания при различных условиях охлаждения – всухую, сжатым воздухом и эмульсионным туманом. В двух последних случаях использовано приспособление, имеющее два сопла для регулирования расхода сжатого воздуха и эмульсии. Существуют два способа ввода тумана в зону

резания – размещая сопло как можно ближе к зоне резания [8] либо на определенном расстоянии от нее [9]. В данном случае использовали второй способ. В качестве активной субстанции применяли эмульсол OPORTET RG-2, концентрация эмульсии 4 %. При тарировании приспособления получены регрессионные зависимости для расчета количества микрокапель на 1 мм<sup>2</sup> поверхности контакта  $N$ , шт./мм<sup>2</sup>, и их среднего диаметра  $D$ , мкм:

$$N = 2,56L^{0,58}E^{0,19}P^{1,772};$$

$$D = 35,9L^{-2,368}E^{1,094}P^{-2,914},$$

где  $L$  – расстояние сопла от поверхности, м;  $E$  – расход эмульсии, г/мин;  $P$  – расход сжатого воздуха, м<sup>3</sup>/ч.

Исследования выполняли в диапазоне скоростей резания 80–450 м/мин, подач – 0,1–0,5 мм/об, расходов эмульсии – 1,5–3,5 г/мин и сжатого воздуха – 4,5–7,0 м<sup>3</sup>/ч. Глубина резания – 1,0 мм. При значительном количестве переменных необходимо было использовать современные методы планирования экспериментальных исследований.

Все эти методы, как известно, позволяют минимизировать количество экспериментальных исследований. Однако наиболее распространенные из них (факторные и композиционные) используют для расчета регрессионной модели полиномы второго порядка. Это значит, что в исследуемой области многомерного пространства должна существовать только одна экстремальная точка (минимум или максимум). Однако при исследовании сложных явлений таких точек может быть несколько, тем более если рассматривается одновременно несколько целевых функций. Простейшие расчеты показывают, что в таких условиях число точек исследований резко возрастает при увеличении количества независимых переменных факторов. Например, для двух независимых переменных в условиях сложного характера исследуемой целевой функции необходимо реализовать порядка 2<sup>5</sup> единичных исследований, а при пяти независимых переменных – уже 5<sup>5</sup>. Очевидно, что такое количество исследований реализовать проблематично.

Для сокращения количества единичных исследований можно использовать планы, бази-

рующиеся на ЛП<sub>т</sub>-последовательностях [10]. Они основаны на таком размещении в многомерном пространстве экспериментальных точек, что их проекции на оси  $X_1$ – $X_2$ ,  $X_2$ – $X_3$ , ...,  $X_i$ – $X_j$  находятся примерно на одинаковых расстояниях друг от друга (рис. 1). Координаты точек исследований можно найти, принимая  $X_{\min} = 0$  и  $X_{\max} = 1$  (табл. 1). Легко заметить, что, реализовав семь единичных экспериментов, можно анализировать зависимость  $Y = f(X_i)$  в семи точках оси  $X_i$ .

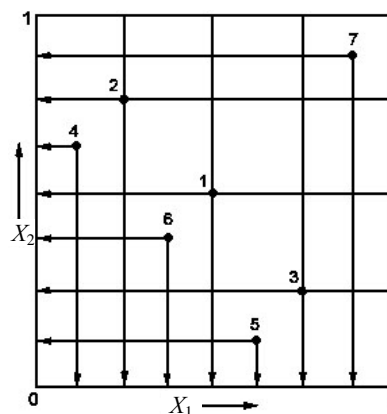


Рис. 1. Проекция семи точек ЛП<sub>т</sub>-последовательности на оси  $X_1$ – $X_2$

Таблица 1

Координаты точек исследований

Фактор	Точка исследования						
	1	2	3	4	5	6	7
$X_1$	0,5000	0,2500	0,7500	0,8750	0,3750	0,6250	0,1250
$X_2$	0,5000	0,7500	0,2500	0,6250	0,1250	0,3750	0,8750
$X_3$	0,5000	0,2500	0,7500	0,1250	0,6250	0,3750	0,8750
$X_4$	0,5000	0,7500	0,2500	0,1250	0,6250	0,8750	0,3750

ЛП<sub>т</sub>-последовательности можно успешно использовать при решении как конструкторских [11], так и технологических задач, например исследований стойкости режущих инструментов [12] или шероховатости обработанной поверхности [13].

**Результаты исследований и их анализ.** Исследовали форму стружки и уровни коэффициента утолщения стружки  $K_a$  с учетом изменений скорости резания  $v$ , подачи  $s$  и условий охлаждения (всухую, сжатым воздухом и эмульсионным туманом). Изменения формы стружки представлены на рис. 2.

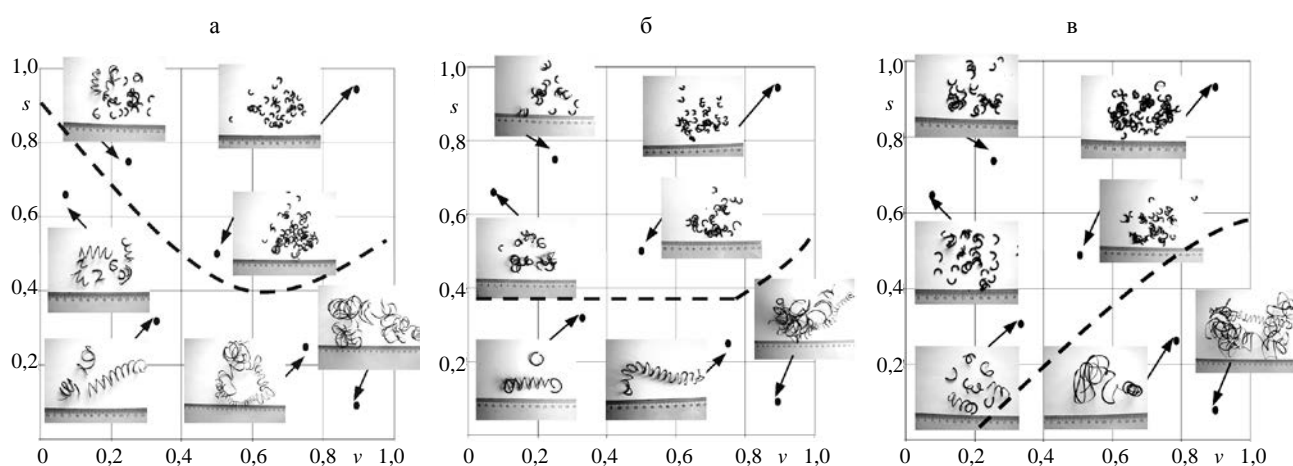


Рис. 2. Изменения формы стружки при точении: а – всухую; б – в струе сжатого воздуха; в – в струе эмульсионного тумана

Стрелки указывают на параметры режимов резания, при которых получена стружка той или иной формы. Пунктирная линия разделяет области формирования двух различных форм стружки в первом приближении. Выше линии формируется стружка в виде коротких фрагментов спирали или элементная. Такая стружка не повреждает обработанную поверхность и легко отводится из зоны резания. Ниже линии формируется путаная стружка или в виде длинных спиралей. Такая стружка ухудшает шероховатость обработанной поверхности при постоянном контакте с последней. Из сравнения графиков рис. 2а–в можно сделать вывод, что охлаждение зоны резания эмульсионным туманом в наибольшей степени расширяет диапазон режимов резания, при которых формируется стружка в виде фрагментов спирали или элементная (рис. 2в).

Благоприятная (фрагментарная) форма стружки обеспечивается при расходе эмульсии в пределах 2 г/мин. При более значительных расходах эмульсии (рис. 3, пунктирная линия) формируется длинная путаная стружка.

Из теории резания известно, что характер стружкообразования, при прочих равных условиях, определяется степенью деформации металла [14]. Деформацию металла достаточно полно описывает коэффициент утолщения стружки  $K_a$ . Расчетный коэффициент утолщения стружки равен  $K_a = a_c/a$  (где  $a_c$  – толщина стружки,  $a$  – средняя толщина срезаемого слоя). Математическая обработка результатов

эксперимента позволила записать уравнения регрессии, описывающие влияние условий обработки (скорость резания  $v$ , м/мин; подачи  $s$ , мм/об; расхода сжатого воздуха  $P$ , м<sup>3</sup>/ч; расхода эмульсии  $E$ , г/мин) на коэффициент утолщения стружки  $K_a$ :

- резание всухую:  $K_a = 21,2v^{-0,344}s^{-0,281}$ ;
- охлаждение струей сжатого воздуха:  $K_a = 1130v^{-0,510}s^{-0,307}P^{-1,790}$ ;
- охлаждение эмульсионным туманом:  $K_a = 57v^{-0,478}s^{-0,103}P^{0,066}E^{-0,274}$ .

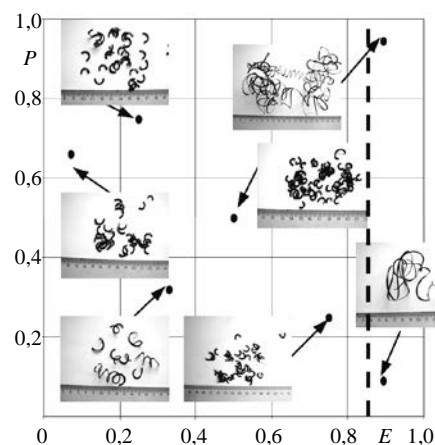


Рис. 3. Влияние условий образования эмульсионного тумана на форму образующейся стружки

При точении всухую значения  $K_a$  практически во всех исследованных диапазонах ( $v > 100$  м/мин) режимов резания больше (до 15 %) по сравнению с другими способами охлаждения зоны резания. Типичный вид зависимостей при фиксированных  $v$  и  $s$  показан на рис. 4.

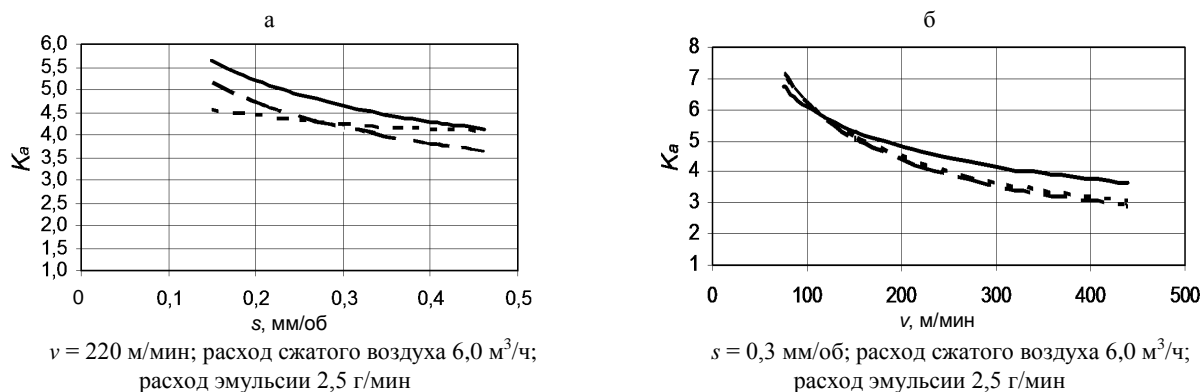


Рис. 4. Влияние условий охлаждения и режимов резания на коэффициент утолщения стружки  $K_a$ :  
 - - - - эмульсионный туман; - · - · - сжатый воздух; — — — всухую

### ВЫВОД

Способ охлаждения зоны резания оказывает существенное влияние на условия стружкообразования. При охлаждении эмульсионным туманом расширяется диапазон режимов резания, при которых формируется стружка в виде коротких фрагментов спирали или элементная. Такая стружка легко отводится из зоны резания и не повреждает обработанную поверхность.

Наименьшие значения коэффициента утолщения стружки  $K_a$  зафиксированы при разных сочетаниях скорости резания и подачи при различных условиях охлаждения. При точении всухую значения  $K_a$  больше на 15 % по сравнению с другими способами охлаждения зоны резания.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gente, A. Chip Formation in Machining Ti6Al14V at Extremely High Cutting Speeds / A. Gente, H. W. Hoffmeister // *Annals of CIRP*. – 2001. – Vol. 50, No 1. – P. 49–52.
2. Schulz, H. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. High-Speed Machining / H. Schulz. – München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1996.
3. Cselle, T. Today's Applications and Future Developments of Coatings for Drill and Rotating Cutting Tools / T. Cselle, A. Barimani // *Surface and Coatings Technology*. – 1995. – Vol. 76–77 (ч. 2). – P. 712–718.
4. Grzesik, W. Podstawy Skrawania Materiałów Metalowych / W. Grzesik. – Warszawa: WNT, 1998.
5. Trockenbearbeitung ist Wirtschaftlich und Umweltfreundlich // *Maschinenmarkt*. – 2001. – No 29. – P. 20–23.
6. Oczóś, K. E. Rozwój Innowacyjnych Technologii Ubytkowego Kształtowania Materiałów, Cz. I / K. E. Oczóś // *Mechanik*. – 2002. – No 8–9. – P. 537–550.

7. Weniger ist oft Mehr // *Maschine + Werkzeug*. – 1996. – No 9. – P. 81–84.
8. Клушин, М. И. Охлаждение и смазка распыленными жидкостями при резании металлов / М. И. Клушин, В. М. Тихонов, Д. А. Троицкая. – Горький: Волго-Вятское книжн. изд-во, 1966.
9. Katalog Sandvik Coromant C-1102:2-POL/01, 2002.
10. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – М.: Наука, 1981.
11. Klocke, F. Coated Tools for Metal Cutting, Features and Applications / F. Klocke, T. Kreig // *Annals of CIRP*. – 1999. – Vol. 48, No 2. – P. 515–525.
12. Фельдштейн, Е. Э. Применение метода ЛП<sub>т</sub>-последовательностей для анализа многофакторных зависимостей в резании металлов / Е. Э. Фельдштейн // *Известия вузов. Машиностроение*. – 1985. – № 3. – С. 148–151.
13. Feldshtein, E. Prawidłowości Kształtowania Stereometrii Powierzchni Elementów ze Spiekanych Materiałów Porowatych na Bazie Żelaza / E. Feldshtein // *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. – 2003. – No 23. – P. 25–33.
14. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.

### REFERENCES

1. Gente, A., & Hoffmeister, H. W. (2001) Chip Formation in Machining Ti6Al14V at Extremely High Cutting Speeds. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 50 (1), 49–52.
2. Schulz, H. (1996) *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. High-Speed Machining*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
3. Cselle, T., & Barimani, A. (1995) Today's Applications and Future Developments of Coatings for Drill and Rotating Cutting Tools. *Surface and Coatings Technology*, 76–77 (Part 2), 712–718. Doi: 10.1016/0257-8972(96)80011-9.
4. Grzesik, W. (1998) *Podstawy Skrawania Materiałów Metalowych*. Warszawa: WNT.

5. **Trockenbearbeitung** ist Wirtschaftlich und Umweltfreundlich. *Maschinenmarkt*, 2001, 29, 20–23.
6. **Oczóś, K. E.** (2002) Rozwój Innowacyjnych Technologii Ubytkowego Kształtowania Materiałów, Cz. I. *Mechanik*, 8–9, 537–550.
7. **Weniger** ist oft Mehr. *Maschine + Werkzeug*, 1996, 9, 81–84.
8. **Klushin, M. I., Tikhonov, V. M., & Troitskaya, D. A.** (1966) *Cooling and Lubrication with Spraying Liquid While Cutting Metals*. Gorky: Volgo-Viatsky Book Publishing House (in Russian).
9. **Katalog Sandvik Coromant C-1102:2-POL/01**, 2002.
10. **Sobol, I. M., Statnikov, R. B.** (1981) *Selection of Optimum Parameters for Problems with Multiple Criteria*. Moscow, Science. (in Russian).
11. **Klocke, F., Kreig, T.** (1999) Coated Tools for Metal Cutting, Features and Applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 48 (2), 515–525.
12. **Feldshtein, E. E.** (1985) Application of ЛП<sub>τ</sub>-Sequential Method for Analysis of Multi-Factor Dependences in Metal Cutting. *Izvestiia Vuzov. Mashinostroenie* [News of HEIs. Mechanical Engineering], 3, 148–151 (in Russian).
13. **Feldshtein, E.** (2003) Prawdłowości Kształtowania Stereometrii Powierzchni Elementów ze Spiekanych Materiałów Porowatych na Bazie Żelaza. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 23, 25–33.
14. **Ordinartsev, I. A., Filippov, G. V., Shevchenko, A. N., Onishko, A. V., & Sergeev, A. K.** (1987) *Reference Book for Toolmaker*. Leningrad, Mashinostroenie (in Russian).

Поступила 22.11.2013

УДК 676.019.2

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНОГО СЫРЬЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЛУФАБРИКАТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА УПАКОВКИ

*Докт. техн. наук КУЗЬМИЧ В. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: kuzmich@tut.by

Проведены исследования различных технологий переработки растительного сырья с целью получения целевого продукта, используемого для производства упаковки. Изучено влияние технологических режимов и введения добавок свежего полиэтилена в уже утилизированное сырье на качественные показатели целевого продукта. Исследования водного предварительного гидролиза растительного сырья показали, что для получения высокого качества целлюлозы из растительного сырья необходимо, чтобы в ней содержалось не менее 2–3 % гемицеллюлоз, иначе ее качественные показатели значительно ухудшаются, что имеет определенное значение для производства упаковки. При этом использование водного раствора углекислого газа для предварительного гидролиза растительного сырья способствует уменьшению разрушения углеводов целлюлозы. В результате возрастают качественные показатели получаемого целевого продукта – целлюлозы, используемой для производства упаковки.

На основе полученных автором данных по содержанию гемицеллюлоз в целлюлозе разработаны режимы проведения сульфатных варок растительного сырья с предварительным гидролизом с целью улучшения физико-механических показателей целевого продукта – целлюлозы.

Полученные результаты при исследовании утилизированных полимеров показали, что характерно возрастание содержания в них низкомолекулярных продуктов. Все это указывает на то, что при использовании полимеров после нахождения их в свалке получаемая из них упаковка будет иметь более низкие качественные показатели. Поэтому во избежание этого при переработке таких полимеров следует добавлять 20–30 % свежих.

**Ключевые слова:** способ переработки сырья, целевой продукт, упаковка.

Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.