

В.А. Марунич, канд. техн. наук, Днепропетровск, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Підвищення ефективності лезвийної обробки матеріалів ґрунтується на розробленому новому процесі, який названий ковзним різанням. Процес забезпечує зменшення силової напруженості процесу в зоні різання, його енергосмності та роботи на подолання деформацій. Сформульована гіпотеза про механізм ковзного різання металів та дано кінематичне визначення процесу ковзного різання матеріалів.

Повышение эффективности лезвийной обработки материалов основывается на разработанном новом процессе, названном скользящим резанием. Процесс обеспечивает уменьшение силовой напряженности процесса в зоне резания, его энергоемкости и работы на преодоление деформаций. Сформулирована гипотеза о механизме скользящего резания металлов и дано кинематическое определение процессу скользящего резания материалов.

The increase of effectiveness edge cutting machining of materials based on the new process. This process has name a sliding cutting. It has ensured the decrease of forces strength of this process in the cutting area, its duty and work for overcoming of deformations. Preconceived hypothesis about mechanics of sliding metalcutting and the kinematic definition of process of sliding cutting of materials is given.

При резании материалов возникают значительные силы и температура, которые приводят к снижению качества поверхностного слоя, производительности и точности обработки. Процессы точения и фрезерования пластичных и упругих материалов сопровождаются значительной работой на преодоление деформаций. В общей работе резания на долю деформации приходится 55%, трения по передней поверхности – 35% и трения по задней поверхности – 10% [1,2].

Установлено, что при резании металлов более 99,5% работы переходит в теплоту [1-4]. Поэтому уменьшение силовой напряженности процесса резания, его энергоемкости и работы на преодоление деформаций, как результат преобразования энергии деформации непосредственно в работу разрыва межатомных или межмолекулярных связей обрабатываемого материала на более ранней стадии является важной научной проблемой. Дело в том, что решение этой проблемы позволит получить более высокое качество поверхностного слоя после точения и фрезерования материалов и исключить дальнейшие доводочные операции, а это является решением важной народно-хозяйственной задачи.

Одним из путей уменьшения работы деформации связывают с высокоскоростным резанием. Идея высокоскоростного резания базируется на теоретическом положении физики твердого тела, согласно которому при увеличении скорости пластической деформации металла область последней

уменьшается и металл становится более хрупким. Вследствие этого уменьшается относительная работа пластической деформации, а, следовательно, количество выделившейся теплоты и более низкая температура в зоне резания [2].

Анализ работ [2,5-11] показывает, что внедрение высокоскоростного резания в производство до настоящего времени носит ограниченный характер и требуется решать множество технических и экономических проблем. Основные из них:

1. Оборудование для высокоскоростного резания должно иметь скорость вращения шпинделя более 30000 об/мин. (новые конструкции шпинделей), повышенную жесткость и температурную компенсацию основных узлов, быстродействие системы ЧПУ. Поэтому станки для высокоскоростного резания являются дорогостоящими [5].

2. При высокоскоростной обработке должна быть обеспечена соответствующая безопасность работ [2,5].

3. Отсутствие нароста, застойной зоны и упрочнение металла в зоне пластического контакта повышают интенсивность адгезионных и диффузионных процессов, что способствует значительному износу режущей части инструмента. Кроме того, существенно влияют на износ инструмента биение и вибрации [11].

4. При сверхскоростной обработке силы инерции достигают до 50% от главной составляющей силы резания [2].

Из вышеизложенного следует, что высокоскоростное резание не решает в полной мере проблему, и, в этой связи, не получило широкого применения в промышленности.

Уменьшение силовой напряженности процесса резания без снижения при этом производительности обработки является важной задачей [12-14]. Авторами этих работ проводились теоретические и экспериментальные исследования энергоемкости процессов лезвийной и абразивной обработки с целью определения условий ее уменьшения и показали, что добиться наиболее существенного снижения энергоемкости при лезвийной обработке можно. Для этого необходимо увеличить коэффициент резания $K_{рез} = P_z/P_y$, где P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания. Однако, как показывает практика, добиться значительного увеличения коэффициента резания $K_{рез}$ при резании традиционными лезвийными инструментами не удается [14].

Для того чтобы добиться снижения работы резания предлагается создать условия, при которых будет проявляться известный эффект Баушингера. Однако обеспечить такие условия при традиционном резании можно только при реверсе вращения заготовки и переустановке резца, что приведет к значительному снижению производительности [15].

На бытовом уровне люди с давних времен используют эффект скользящего резания, который заключается в том, что при внедрении лезвия в материал осуществляется его скольжение по обрабатываемой поверхности. Примером может служить форма сабли наших предков, запорожских казаков, и умение казаков рубить «наотмашь». Косари на сенокосе выполняют косой подсекающие движения для эффективного скоса травостоя. Все мы с вами при нарезании хлеба, не задумываясь, совершаем возвратно-поступательные движения ножом, чтобы уменьшить деформацию хлеба перед его разделением на части.

Для повышения эффективности лезвийной обработки материалов путем уменьшения силовой напряженности процесса резания, его энергоемкости и работы на преодоление деформаций обрабатываемого материала разработан новый процесс, названный скользящим резанием.

Под скользящим резанием понимается процесс обработки, при котором скольжение режущей кромки, во время рабочего цикла, по поверхности резания в направлении главного движения превалирует над ее перемещением в направлении движения подачи.

Положительное влияние эффекта скользящего резания с целью достижения высокого качества обработанной поверхности приведены в работах [16-25].

Необходимым условием проявления эффекта скользящего резания для управления интенсивностью физических процессов, происходящих в зоне резания, является установление угла наклона кромки λ в пределах: $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$.

Такое положение режущей кромки лезвия инструмента в принципиальной кинематической схеме резания существенным образом меняет соотношение угловых и линейных скоростей элементарных абсолютных движений, сообщаемых точкам режущей кромки и заготовке.

Анализ и теоретическое исследование возможных принципиальных кинематических схем резания и движения их составляющих с эффектом скольжения кромки по поверхности резания, открывают широкие возможности для создания новых, в настоящее время еще неизвестных, методов обработки и конструкций режущих инструментов.

Гипотеза о механизме скользящего резания металлов заключается в следующем.

Механизм: при контакте инструмента с заготовкой, режущая кромка которого, во время рабочего цикла, скользит по поверхности резания в направлении главного движения и перемещается в направлении движения подачи, происходит их силовое взаимодействие. При этом первоначальный контакт рабочей части инструмента с заготовкой произойдет между вершиной выступа субшероховатости режущей кромки, который находится ближе к обрабатываемой поверхности, и обрабатываемым металлом. В результате силового воздействия выступа на обрабатываемый металл

возникают растягивающие напряжения в направлении скорости резания и сжимающие напряжения в направлении скорости подачи. Таким образом, происходит локализация напряжений разного характера (растяжения и сжатия) в поверхностном слое обрабатываемого металла и создаются условия стеснения подвижности его атомов. При достижении силы межатомных связей происходит разрыв этих связей и образуется микротрещина, которая развивается в направлении движения подачи. Скользящее движение кромки по обрабатываемой поверхности включает новые последующие контактные силовые взаимодействия выступов субшероховатости и шероховатости с обрабатываемым материалом, следствием которого является образование множества микротрещин. Образовавшиеся микротрещины объединяются в макротрещину, которая начинает распространяться перед режущей кромкой при ее перемещении, разрушая металл на более ранней стадии пластической деформации в направлении движения подачи. Макротрещина перемещается одновременно с режущей кромкой в плоскости резания. В результате происходит срезание слоя обрабатываемого металла и формируется сливная стружка, которая представляет собой сплошную ленту без разрывов и трещин.

При скользящем резании обеспечивается гораздо лучшее проникновение лезвия в металл и за счет «кинематического заострения».

Дело в том, что в результате новой кинематики, осуществляемой, например, при скользящем точении, существенно изменяются угловые кинематические параметры, которые в значительной степени отличаются от кинематических параметров при традиционном точении.

Сущность новой кинематики заключается в следующем (рис.1).

Первоначальный контакт режущей кромки 1 с обрабатываемой заготовкой 2 произойдет в точке m . Точка m , занимая свое пространственное положение в принципиальной кинематической схеме, в результирующем движении, перемещаясь по обрабатываемой поверхности 3 , во время рабочего цикла, займет положение m' , а последней точкой режущей кромки, которая войдет в контакт с заготовкой в конце рабочего цикла будет точка k в положении k' . Все точки режущей кромки за первый рабочий цикл будут постепенно врезаться в обрабатываемый материал со смещением (скольжением) по поверхности, образуемой кромкой в результирующем движении в направлении скорости резания V от m до k . При этом перемещение каждой точки режущей кромки, во время рабочего цикла, по обрабатываемой поверхности в направлении движения подачи D_S будет различным, и изменяться от перемещения точкой m , равное подаче S , до нуля в точке k' . При следующем рабочем цикле точка m переместится по обрабатываемой поверхности в направлении движения подачи D_S на расстояние $2S$, а точка k на расстояние S .

Рабочая длина режущей кромки K_p определяется из соотношения:

$$K_p = \frac{S}{\cos \lambda}.$$

Из рис.1 следует, что точки режущей кромки, перемещаясь в направлении движения подачи D_S и в направлении главного движения резания D_G , одновременно сдвигаются (скользят) в направлении главного движения резания D_G от m до k' . Скорость движения точек режущей кромки V_K равна векторной сумме скоростей их перемещения в осевом направлении V_S и скольжения в направлении главного движения резания $V_{СК}$ (рис.2).

Соотношение скоростей скольжения и перемещения в направлении движения подачи точек режущей кромки определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{V_{СК}}{V_S}.$$

Таким образом, учитывая, что при скользящем резании угол наклона режущей кромки находится в пределах $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$, а $\operatorname{tg} 70^\circ = 2,7$ и возрастает с увеличением угла λ , то скорость скольжения в направлении главного движения резания больше скорости перемещения в осевом направлении от 2,7 до бесконечности при $\lambda = 90^\circ$.

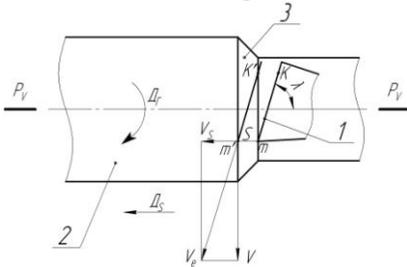


Рисунок 1 – Схема перемещения точек режущей кромки по поверхности резания, во время рабочего цикла: 1-режущая кромка; 2-заготовка; 3 – поверхность резания

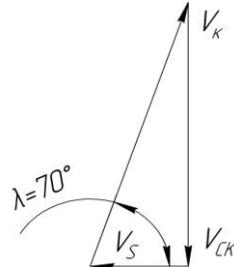


Рисунок 2 – Треугольник скоростей движения точек режущей кромки

Приведенные особенности скользящего продольного точения вносят существенные отличия кинематических углов резания рассматриваемого процесса от традиционного.

Кинематический угол наклона режущей кромки λ_k измеряется в плоскости резания в кинематической системе координат, а в данном случае плоскость резания совпадает с рабочей плоскостью P_S [27-29] и определяется:

$$\lambda_k = \lambda_u - \eta, \quad (1)$$

где η – угол скорости резания (угол между направлением скоростей результирующего движения резания и главного движения резания).

Для установления зависимости других кинематических угловых параметров от значений инструментальных и величины кинематического угла наклона кромки λ_k рассмотрим схему на рис. 3.

На рисунке 3 показано врезание произвольной точки N режущей кромки лезвия токарного проходного резца в обрабатываемый металл. Известно, что стружка сходит по передней поверхности в направлении $90^\circ-\lambda_k$, то есть в направлении NK . Предположив, что задняя поверхность лезвия лежит в рабочей плоскости Ps (задний угол $\alpha=0$), рассмотрим кинематический угол заострения β_k и кинематический передний угол γ_k . Так как инструментальные углы измеряются в нормальной секущей плоскости Pn , а кинематические – в кинематической главной секущей плоскости $P\tau k$, то между этими углами существует геометрическая связь, которая проявляется в следующем:

$$a \cdot \operatorname{tg} \beta_u = b \cdot \operatorname{tg} \beta_k = h, \quad (2)$$

где h – общая высота лезвия проходного резца; a, b – соответствующие размеры по рис. 3

Так как между размерами существует зависимость:

$$\frac{a}{b} = \cos \lambda_k, \quad (3)$$

то, подставив выражение (1) и (3) в (2), получим следующую формулу:

$$\operatorname{tg} \beta_k = \operatorname{tg} \beta_u \cdot \cos \lambda_k = \operatorname{tg} \beta_u \cdot \cos \lambda_u - \eta. \quad (4)$$

Из формулы (4) определим зависимость для кинематического угла заострения β_k лезвия проходного резца для скользящего точения от угла заострения β_u и инструментального угла наклона кромки λ_u :

$$\beta_k = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \beta_u \cdot \cos \lambda_u - \eta \right]. \quad (5)$$

При этом на зависимость (5) накладывает отпечаток скорость подачи V_s , так как $\eta = f \cdot V_s$.

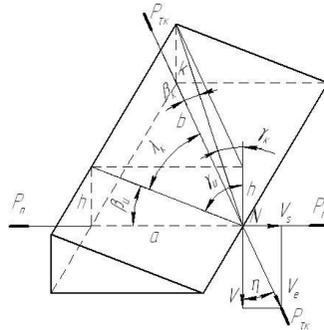


Рисунок 3 – Схема определения кинематических угловых параметров лезвия при скользящем точении

Кинематический передний угол γ_k измеряется в направлении схода стружки по передней поверхности и определяется аналогично углу β_k из геометрической зависимости:

$$\frac{a}{\operatorname{tg} \gamma_u} = \frac{b}{\operatorname{tg} \gamma_k} = h, \quad \operatorname{tg} \gamma_k = \frac{\operatorname{tg} \gamma_u}{\cos \lambda_k}. \quad (6)$$

Подставив соответствующие значения в выражение (6) получим:

$$\gamma_k = \arctg \frac{\operatorname{tg} \gamma_u}{\cos \lambda_u - \lambda}. \quad (7)$$

Значение кинематического заднего угла α_k определяется по формуле [30]:

$$\alpha_k = \arctg \left[\operatorname{tg} \alpha_u \cdot \cos \lambda_u - \lambda \right].$$

При скользящем резании угол наклона кромки λ устанавливается в пределах $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$, подставив это значение угла в формулы (5) и (7) получим, что передний кинематический угол γ_k увеличивается в 4 и более раза, а угол заострения уменьшается в 4 и более раза.

Таким образом, происходит существенное «кинематическое заострение».

Условие стеснения подвижности атомов или молекул в зоне скользящего резания и разрыв связей на более ранней стадии деформации можно объяснить на примере деформированного состояния малого объема тела. Различают три основных вида деформированного состояния малого объема тела [1].

1. Растяжение (рис. 4,а), при котором вдоль одной из трех главных осей деформации наблюдается удлинение, а вдоль двух остальных главных осей – укорочение.

2. Сжатие (рис. 4,б), при котором вдоль одной из трех главных осей деформации наблюдается укорочение, а вдоль двух остальных главных осей – удлинение.

3. Сдвиг (рис. 4,в), при котором деформация вдоль одной из трех главных осей отсутствует, вдоль второй главной оси наблюдается укорочение, а вдоль третьей главной оси – равное ему удлинение.

При скользящем резании (рис. 4,г) напряжения растяжения действуют в направлении главного движения (ось y), а напряжения сжатия в направлении движения подачи (ось x). Таким образом, вдоль оси y должно происходить усиленное удлинение, вдоль оси x – усиленное укорочение, а вдоль оси z – одновременное удлинение и укорочение.

Экспериментальное подтверждение снижения энергоемкости процесса скользящего резания материалов (пенопластов) приведено в работе [26].

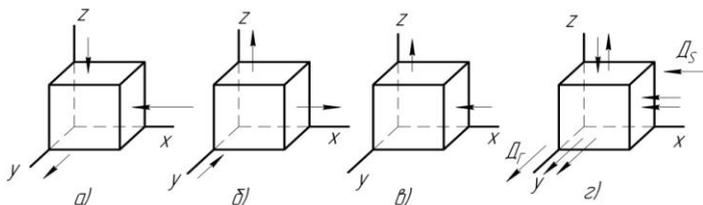


Рисунок 4 – Виды деформированного состояния малого объема тела

Количество теплоты при резании металлов можно определить выражением[31,32]:

$$Q = Q_o + Q_{mn} + Q_{mz} ,$$

где Q_o – теплота деформации, образующаяся на условной плоскости сдвига; Q_{mn} – теплота трения, образующаяся на передней поверхности режущего инструмента в пределах длины контакта между стружкой и инструментом; Q_{mz} – теплота трения на задней поверхности режущего инструмента в пределах площадки контакта между задней поверхностью и поверхностью резания.

При скользящем резании металла теплота деформации Q_o незначительна в связи с действием нового механизма. Энергия деформации преобразовывается в работу разрыва межатомных связей на более ранней стадии.

Теплота трения Q_{mn} , образующаяся на передней поверхности режущего инструмента между стружкой и контактной поверхностью, возрастает в результате увеличения длины контакта (см. рис.3) и трения, как следствия скольжения по обрабатываемой поверхности лезвия инструмента.

Теплота трения Q_{mz} на задней поверхности также возрастает по вышеупомянутым причинам.

Не смотря на повышение температуры в результате увеличения внешнего трения по передней и задней поверхностям лезвия инструмента, при определенных параметрах режима скользящего точения, заготовка и инструмент нагреваются слабо. Процесс отделения стружки от заготовки происходит практически при «холодном точении» металла. В этой связи отпадает необходимость применения СОТС, что позволяет решить важную народнохозяйственную задачу по улучшению экологии в механических цехах.

Результаты проведенных опытов полностью подтвердили предположение о «холодном точении» металлов при скользящем резании и достижении высокого качества обработанной поверхности.

Шероховатость обработанной поверхности измеряли на информационно-вычислительном комплексе мод. 170623.1, который предназначен для подключения датчика и мотопривода профилометра модели 107622 к персональному настольному компьютеру типа IBM/PC и управления их работой в процессе измерения и обработки сигнала измерительной информации – трассирования, снятия профиля, его визуализации. Комплекс проводил измерения геометрических размеров особенностей профиля, вычисления параметров шероховатости, а также запись результатов измерений на компьютер и распечатку их на принтере.

Профилограмма и результаты измерений приведены на рис.5.

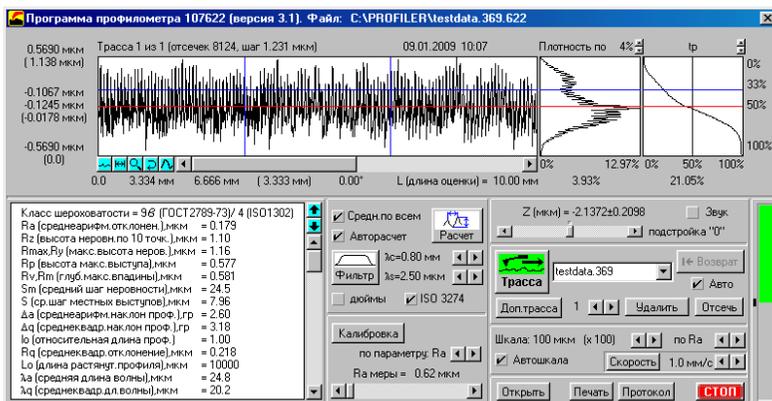


Рисунок 5 – Профилограмма обработанной поверхности стали 45 скользящим точением

Выводы: 1. Разработан новый процесс скользящего резания материалов, основанный на новой кинематике движения точек режущей кромки, в результате которой в контактной зоне лезвия и заготовки действуют напряжения разного характера: растяжения и сжатия. Это создает условие стеснения подвижности молекул или атомов обрабатываемого материала непосредственно перед режущей кромкой и наступает хрупкое разрушение, представляющее собой разрыв с низкой энергией. Скользящее резание материалов позволяет обеспечить высокое качество обработанной поверхности при точении металлов: $Ra=0,18$ мкм. 2. Сформулирована гипотеза о механизме скользящего резания металлов и дано кинематическое определение процессу скользящего резания материалов. Показано, что основой обеспечения эффекта скользящего резания является установление угла наклона режущей кромки λ в пределах $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$. 3. Характерным для скользящего точения металлов является низкая температура в зоне резания из-за преобразования энергии деформации в работу разрыва межатомных связей обрабатываемого материала при отделении части материала (стружки) и формирования новых поверхностных слоев деталей на более ранней стадии деформации. 4. Выведены формулы для определения числовых значений кинематического угла заострения β_k и переднего угла γ_k для скользящего продольного точения материалов. При этом установлено, что при скользящем резании имеет место существенное «кинематическое заострение». Кинематический угол заострения β_k уменьшается более чем в 4 раза по сравнению с инструментальным углом заострения β_n , а кинематический передний угол γ_k увеличивается более чем в 4 раза по сравнению с передним инструментальным углом γ_n . 5. Показана причина разрыва межатомных связей на более ранней стадии деформации обрабатываемого материала на примере деформированного состояния малого объема тела.

Список использованных источников: 1. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. – 344с. 2. *Яцерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А.* Теория резания. – Минск – Москва: Новое знание, 2007. – 512с. 3. *Зворыкин К.А.* Работа и усилие, необходимые для отделения металлической стружки. Сб. «Технический сборник и вестник промышленности», С-Петербург, 1883. 4. *Брикс А.А.* Резание металлов. С-Петербург. 1896. 5. *Внуков Ю.Н., Павлюченко И.Н.и др.* Проблемы эффективного внедрения процессов высокоскоростного резания // Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей / За заг. ред. А.І. Грабченка. – Том 1. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – С.43-56. 6. *Gente A.* Chip Formation in Machining Ti6Al14V at Extremely High Cutting Speeds / A. Gente, H.-W. Hoffmeister // Annals of CIRP. 2001. V. 50. № 1. P. 49-52. 7. *Потапов А.А.* Высокоскоростная обработка / А.А. Потапов, Г.И. Айзеншток. М.: ВНИИТЭМР, 1986. 8. *Toenshoff H.K.* Chip Formation at High Cutting Speeds / H.K. Toenshoff, H. Winkler, M. Patzke // ASME PED. 1984. V. 12. P. 95-104. 9. *Ippolito R.* High Speed Machining: Tool Performance and Surface Finish in Steel Turning / R. Ippolito, R. Tornincasa, R. Levi // Annals of CIRP. 1988. V. 37. №1. P. 105-108. 10. *Flom D.G.* High-speed machining / D.G. Flom, R. Komanduri // Metal Handbook. V.16. Machining ASM International, 1989. S. 597-606. 11. *Scherer J.* Zerspanenvon Aluminium bei hohen Schnittgeschwindigkeiten / J. Scherer // Wersstatt und Betrieb. 1984. Bd. 117. №7 S. 355-358. 12. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. Пособие / *Якимов А.В., Новиков Ф.В.и др.* – Одесса: ОГПУ, 1999. 450с. 13. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новоикова и А.В. Якимова.* В десяти томах. – Т.1 «Механика резания материалов» – Одесса: ОНПУ, 2002. –580с. 14. *Новиков Т.В., Кленов О.С.* Исследование энергоёмкости процессов лезвийной и абразивной обработки материалов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ» 2008.– Вып.75. – С. 282-288. 15. *Федотьева Л.П., Надсін В.С., Федотьев А.М.* Визначення меж раціонального використання керованого процесу ротаційного різання // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ» 2008.– Вып.75. – С. 420-427. 16. Режущий инструмент А.с. 1117149. СССР. / *В.А. Марунич, Ю.А. Барковскийи др.* – Оpubл. 1984, Бюл. №37. 17. Режущий инструмент А.с. 1136381. СССР. / *В.А. Марунич, В.Д. Дручков и др.* – 1984. 18. Режущий инструмент А.с. 1152723. СССР. / *В.А. Марунич, В.Д. Дручков, Н.Я. Горбатко.* – Оpubл. 1985, Бюл. №16. 19. Инструмент для механической обработки материалов А.с. 1219387. СССР. В29С37/00 / *В.Д. Дручков, В.А. Маруничи др.* – № 3649606/23-05; Заявл. 10.10.83; Оpubл. 23.03.86, Бюл. №11. – 2с.: ил. 20. Режущий инструмент для обработки пенопластов А.с. 1240609. СССР. В29С37/00 / *В.А. Марунич, А.Т. Коновалов и др.* – № 3853609/23-05; Заявл. 11.02.85; Оpubл. 30.06.86, Бюл. №24. – 2с.: ил. 21. Резец для обработки полимерных материалов А.с. 1351803. СССР. В29С37/00 / *В.А. Марунич, Л.И. Таран и др.* – № 3924590/23-05; Заявл.08.07.85; Оpubл. 15.11.87,Бюл. №42 – 3с.: ил. 22. Патент России 2031790. Способ обработки материалов резанием / *В.А. Марунич.* Бюл. №9. – 1995. 23. Патент України 19905. Спосіб обробки матеріалів різанням / *В.О. Марунич.* Бюл. №1. – 2007. 24. Патент України 88094. Спосіб обробки матеріалів різанням / *В.О. Марунич.* Бюл. №17. – 2009. 25. *Марунич В.А.* Новый процесс скользящего резания материалов. / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов. – Донецк, 2009. – Вып.38. – С.133-138. 26. *Марунич В.А., Ярыз А.Ю.* Новые подходы к обработке полимеров резанием. / Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып.75. – С.234-242. 27. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий. 28. ГОСТ 25751-83 Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий. 29. ГОСТ 25761-83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий. 30. *Марунич В.А.* Исследование кинематики обработки резанием теплоизоляционных пенополиуретановых покрытий сферических изделий. Теория и практика металлургии, 2007, С.53-58. 31. *Резников А.Н.* Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. – М.: Машгиз, 1963 – 200с. 32. *Солоненко В.Т., Рыжский А.А.* Резание металлов и режущие инструменты. М.: Высшая школа, 2007. 414с.

Поступила в редколлегию 25.01.2010