

УДК 621.9
DOI: 10.12737/18318

С. В. Михайлов, А. С. Михайлов

РАЗРАБОТКА СМЕННЫХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН С КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Разработана конструкция твердосплавных тангенциальных пластин с комбинированной задней поверхностью повышенной износостойкости. Представлены результаты производственных испы-

таний новых пластин на операции фрезерования рельсов.

Ключевые слова: резание материалов, проектирование инструмента, моделирование износа, режущие пластины, фрезерование рельсов.

S.V. Mikhailov, A.S. Mikhailov

DEVELOPMENT OF REPLACEABLE CUTTING INSERTS WITH COMBINED FLANKS

The flank wear rate of cutting inserts grows in proportion as the force and cutting temperature increase which in their turn depend on the value of bevel edge wear. It is possible to reduce the influence of a tool contact area with the work piece upon processes accelerating wear by means of changing the flank form. The paper reports the methods for the estimation of wear resistance of flanks in cutters of different forms.

There is offered a new design of replaceable tangential cutting inserts with a combined form of an end flank allowing the considerable increase of a tool life without decrease of work piece quality. The results of new cutting insert manufacturing testing in rail milling operations are presented.

Key words: material cutting, tool design, wear modeling, cutting inserts, rail milling.

В настоящее время широкое распространение получили операции фрезерования с использованием сборных цилиндрических фрез, оснащенных твердосплавными сменными многогранными пластинами с тангенциальной схемой закрепления. К числу таких операций относится фрезерование головки железнодорожных рельсов.

Профилирующая фреза диаметром 560 мм комплектуется 192 пластинами SNEX 1207AN с прямолинейными режущими кромками и 48 пластинами SNEX 1207AN-15 с криволинейными кромками. За счет специального расположения пластин относительно друг друга реализуется косоугольная свободная схема резания. Инструмент работает в следующих условиях: обрабатываемый материал рельсов – специальная высокопрочная сталь Р65, скорость резания $v = 176...180$ м/мин, подача $s = 3...6$ м/мин, глубина фрезерования $t = 0,3...0,6$ мм. Период стойкости фрезы

ограничен величиной износа задней поверхности пластины и определяется по технологическим признакам. При достижении предельно допустимой величины износа качество обработанной поверхности резко ухудшается и процесс обработки прекращается. Ухудшение качества поверхности рельсов внешне проявляется в образовании прижогов и задиров. Критическая величина фаски износа для операции фрезерования рельсов составляет 0,6...0,7 мм.

Производительность и эффективность механической обработки во многом зависит от стойкости режущих пластин. Высокая интенсивность изнашивания сменных пластин приводит к росту вспомогательного времени на подготовку инструмента и большому расходу дорогостоящих пластин. Поэтому проблема повышения работоспособности фрезерных тангенциальных пластин является актуальной.

Моделирование процесса изнашивания фрезерных пластин с различной геометрией задней поверхности

В условиях резания сборными цилиндрическими фрезами подача на зуб инструмента не превышает 0,1 мм. Из-за этого задняя поверхность лезвия оказывается более нагруженной и подвергается более интенсивному изнашиванию, чем передняя. Например, при фрезеровании железнодорожных рельсов визуально видимые признаки износа имеются только на задней поверхности лезвия и отсутствуют на передней поверхности (рис. 1). Для таких операций стойкость инструмента следует рассматривать с позиций преимущественного износа по задней поверхности.

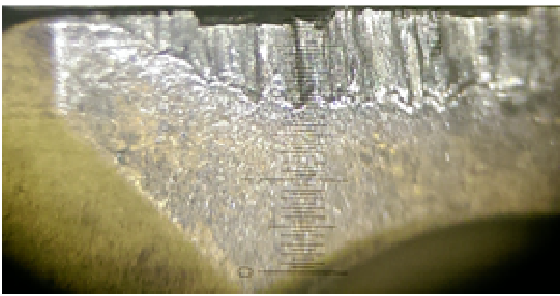


Рис. 1. Износ задней поверхности пластин SNEX 1207AN-15

Под износостойкостью будем понимать отношение работы сил трения, затраченной на превращение в продукты износа трущейся поверхности инструмента, к массе продуктов износа в конкретных условиях взаимодействия [1]. В общем случае износ твердосплавного режущего инструмента происходит путем отделения частиц износа, размер которых зависит от контактной прочности твердого сплава и на порядок меньше величины зерна металлокерамики. Для отделения частицы износа от массы основного материала требуется достижение в локальном объеме критического значения энергии для данного материала. Поток энергии, вызванный диссипацией механической энергии трения, распределяется между трущимися телами. При этом большая часть энергии трансформируется в тепловую, а оставшаяся накапливается в поверхностном слое в виде дефектов структуры, которые инициализируют отделение частиц износа с поверхности трения.

На интенсивность изнашивания существенное влияние оказывают скорость резания, коэффициент трения между обрабатываемым материалом и инструментом, контактное давление на рабочих поверхностях инструмента, температура резания. Неоднозначное влияние оказывает площадь взаимного контакта трущихся поверхностей. На участке нормального износа интенсивность изнашивания режущей пластины практически не зависит от величины фаски износа. При достижении некоторой критической величины фаски скорость изнашивания инструмента увеличивается. Уменьшить влияние площади контакта инструмента с обрабатываемой деталью на процессы, ускоряющие износ, можно путем изменения геометрии задней поверхности инструмента [2].

Обоснование и выбор оптимальной геометрии задней грани режущей пластины выполним путем теоретического анализа динамики изнашивания пластины. На основании энергетического механизма изнашивания инструмента объемный расход Q изнашиваемого материала упрощенно можно представить как функцию, зависящую от мощности резания и прочности твердого сплава:

$$Q = \frac{P_z v}{HV} C,$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; v – скорость резания; HV – твердость инструмента; C – коэффициент, учитывающий конкретные условия резания, в том числе физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов.

Контактная твердость инструмента из твердого сплава зависит от температуры и может быть рассчитана по формуле [3]

$$HV = HV_o \exp(-k_\theta \theta),$$

где HV_o – твердость при комнатной температуре; k_θ – коэффициент температурного разупрочнения твердого сплава; θ – температура контакта.

Учитывая относительно слабое влияние ширины фаски износа h_3 на тангенциальную составляющую силы резания P_z и незначительное изменение твердости инструмента HV до момента его катастрофи-

ческого износа, объемный расход Q изнашиваемого материала примем неизменным во времени для конкретных пар трения и условий эксплуатации. Возможность такого упрощения подтверждает прямолинейный характер зависимости нормального износа пластины от времени резания.

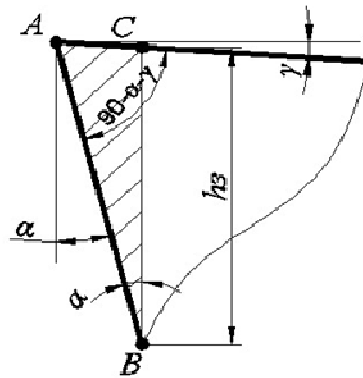
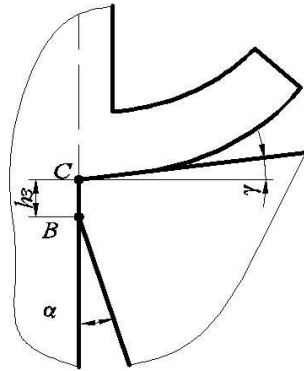


Рис. 2. Расчетная схема для объема изношенной части режущей пластины с плоскими рабочими поверхностями

Объем данной призмы равен произведению площади поперечного сечения износа S_{ABC} на длину активного участка режущей кромки b :

$$V = S_{ABC} b.$$

Площадь треугольника S_{ABC} определим по стороне $BC=h_3$ и углам треугольника:

$$S_{ABC} = \frac{h_3^2 \sin \alpha \cos \gamma}{2 \cos(\alpha + \gamma)}.$$

Окончательно объем изношенной части режущей пластины равен

$$V = \frac{bh_3^2 \sin \alpha \cos \gamma}{2 \cos(\alpha + \gamma)},$$

где b – длина активного участка режущего лезвия; h_3 – линейный износ инструмента по задней поверхности; α и γ – соответственно задний и передний углы инструмента.

Из отношения объема изношенной части режущей пластины V к объемному расходу Q изнашиваемого материала установим связь между величиной износа по задней поверхности h_3 и временем работы инструмента T :

$$T = \frac{V}{Q} = \frac{bh_3^2 \sin \alpha \cos \gamma}{2Q \cos(\alpha + \gamma)}. \quad (1)$$

Для перехода к износостойкости инструмента рассчитаем объем изношенной части пластины. У стандартного инструмента с плоскими рабочими гранями, работающего по схеме свободного резания, объем износа инструментального материала представляет собой геометрическое тело в форме треугольной призмы (рис. 2).

Согласно модели (1), в процессе резания фаска износа h_3 изменяется в соответствии с зависимостью

$$h_3 = \sqrt{\frac{T2Q \cos(\alpha + \gamma)}{b \sin \alpha \cos \gamma}}. \quad (2)$$

Учитывая относительно слабое влияние ширины фаски износа h_3 на расход изнашиваемого материала Q до момента его катастрофического износа, формулу (2) можно представить в виде

$$h_3 = C_h \sqrt{\frac{T \cos(\alpha + \gamma)}{\sin \alpha \cos \gamma}}, \quad (3)$$

где C_h – коэффициент, зависящий от условий эксплуатации и свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Этот коэффициент может быть определен по одной из точек экспериментальной кривой износа. При фрезеровании рельсов со скоростью $v = 180$ м/мин, глубиной $t = 0,6$ мм, подачей $s = 6$ м/мин коэффициент $C_h = 0,027$.

Полученная зависимость (3) позволяет определить характер и степень влияния геометрических параметров лезвия инструмента на интенсивность изнашивания. Расчеты показывают, что с увеличением заднего угла инструмента скорость износа уменьшается (рис. 3).

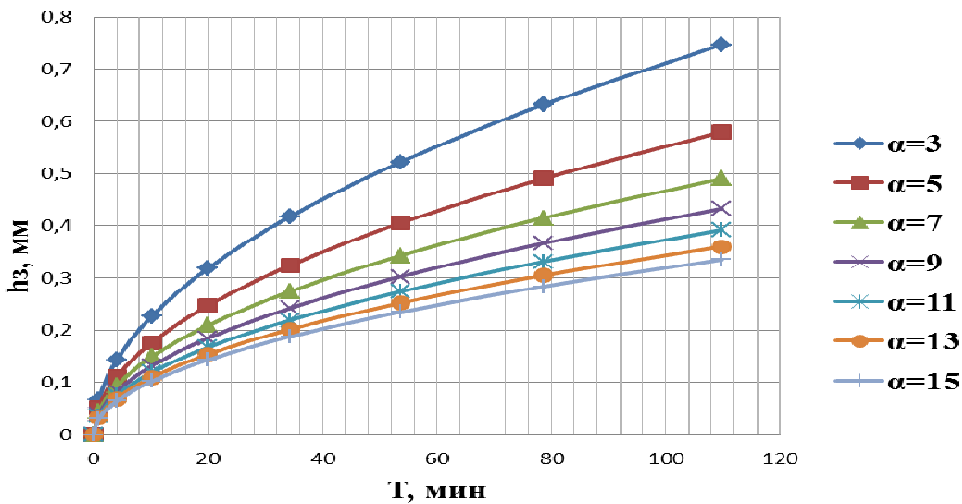


Рис. 3. Расчетные кривые износа инструмента с плоской задней поверхностью (\$C_h = 0,027, \gamma = -8^\circ, \alpha = 3...15^\circ\$)

Влияние заднего угла на износостойкость режущей пластины наиболее сильно проявляется в диапазоне малых значений задних углов. При изменении заднего угла от 5 до 9° стойкость инструмента увеличивается почти в 2 раза. Столь существенное влияние заднего угла на износостойкость инструмента позволяет утверждать о возможности и высокой эффективности управления динамикой износа инструмента путем изменения геометрической формы его задней поверхности.

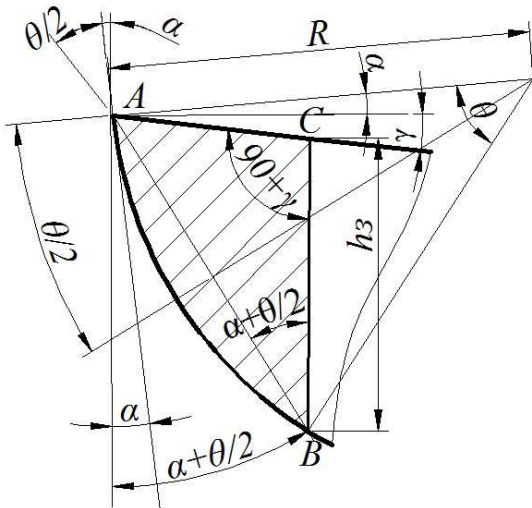


Рис. 4. Расчетная схема для объема изношенной части режущей пластины с выпуклой формой задней поверхности

Применим изложенную методику для изучения влияния видоизмененной формы задней поверхности на износостойкость инструмента. Рассмотрим лезвие инструмента с выпуклой радиусной формой задней поверхности (рис. 4).

Объем износа такого инструмента до величины фаски \$h_3\$ равен произведению площади поперечного сечения износа \$S_{изн}\$ на длину активного участка режущей кромки \$b\$:

$$V = S_{изн} b. \tag{4}$$

Площадь поперечного сечения износа может быть определена как сумма площадей треугольника \$ABC\$ и сегмента \$AB\$:

$$S_{изн} = S_{ABC} + S_{сег}^{AB}. \tag{5}$$

Площадь треугольника \$S_{ABC}\$ найдем по стороне \$BC=h_3\$ и углам треугольника:

$$S_{ABC} = \frac{h_3^2 \sin(\alpha + \frac{\theta}{2}) \cos(\gamma)}{2 \cos(\alpha + \frac{\theta}{2} + \gamma)}. \tag{6}$$

Площадь сегмента \$AB\$ окружности радиусом \$R\$ равна

$$S_{сег}^{AB} = \frac{R^2}{2} (\pi \frac{\theta}{180} - \sin \theta), \tag{7}$$

где \$\theta\$ – угол в градусах.

Для установления зависимости угла \$\theta\$ от величины \$h_3\$ рассмотрим треугольник \$ABC\$. По теореме синусов

$$\frac{h_3}{\sin(90 - (\alpha + \frac{\theta}{2} + \gamma))} = \frac{AB}{\sin(90 + \gamma)},$$

$$AB = \frac{h_3 \cos \gamma}{\cos(\alpha + \frac{\theta}{2} + \gamma)}. \quad (8)$$

С другой стороны, длина хорды АВ окружности радиусом R равна

$$AB = 2R \sin \frac{\theta}{2}. \quad (9)$$

Приравняв уравнения (8) и (9), получим

$$\frac{h_3 \cos \gamma}{\cos(\alpha + \frac{\theta}{2} + \gamma)} = 2R \sin \frac{\theta}{2},$$

откуда

$$h_3 = \frac{2R \sin \frac{\theta}{2} \cos(\alpha + \frac{\theta}{2} + \gamma)}{\cos \gamma}. \quad (10)$$

Выражения (4 – 10) устанавливают связь между фаской износа h_3 и объемом износа V инструмента с выпуклой формой задней поверхности.

Для инструмента с вогнутой формой задней поверхности расчетные формулы износостойкости получим с помощью схемы на рис. 5.

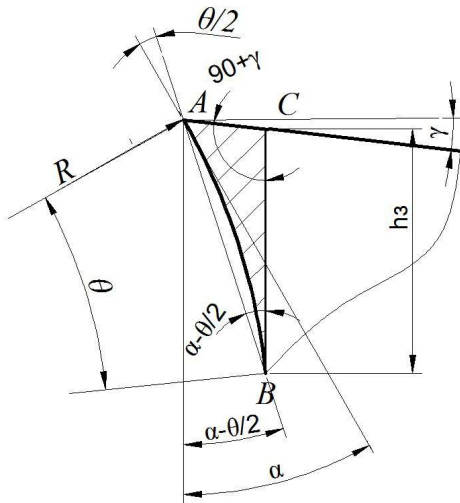


Рис. 5. Расчетная схема для объема изношенной части режущей пластины с вогнутой формой задней поверхности

Площадь поперечного сечения износа инструмента с вогнутой радиусной формой задней поверхности определим через разность площадей треугольника ABC и сегмента AB:

$$S_{\text{изн}} = S_{ABC} - S_{\text{сег}}^{AB}. \quad (11)$$

Площадь треугольника S_{ABC} найдем по стороне $BC=h_3$ и углам треугольника:

$$S_{ABC} = \frac{h_3^2 \sin(\alpha - \frac{\theta}{2}) \cos(\gamma)}{2 \cos(\alpha - \frac{\theta}{2} + \gamma)}. \quad (12)$$

Площадь сегмента AB рассчитывается по формуле (8).

Согласно теореме синусов, из треугольника ABC следует

$$\frac{h_3}{\sin(90 - \alpha + \frac{\theta}{2} - \gamma)} = \frac{AB}{\sin(90 + \gamma)}. \quad (13)$$

Подставив AB из уравнения (9), получим зависимость величины h_3 от угла θ :

$$h_3 = \frac{2R \sin \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \frac{\theta}{2} + \gamma)}{\cos \gamma}. \quad (14)$$

Выражения (4–10) и (11–14) были использованы для построения кривых износа пластин с выпуклыми и вогнутыми задними поверхностями. Расчеты проводили по следующему алгоритму: 1) задавались величиной θ ; 2) рассчитывали ширину фаски износа h_3 ; 3) рассчитывали объем износа инструмента V ; 4) из равенства уравнений (2) и (3) определяли объемный расход материала $Q = C_h^2 b / 2$; 5) рассчитывали стойкость инструмента $T = V/Q$ в зависимости от h_3 .

Полученные расчетные кривые износа пластин с криволинейными задними поверхностями в сравнении с кривой износа стандартных пластин представлены на рис. 6.

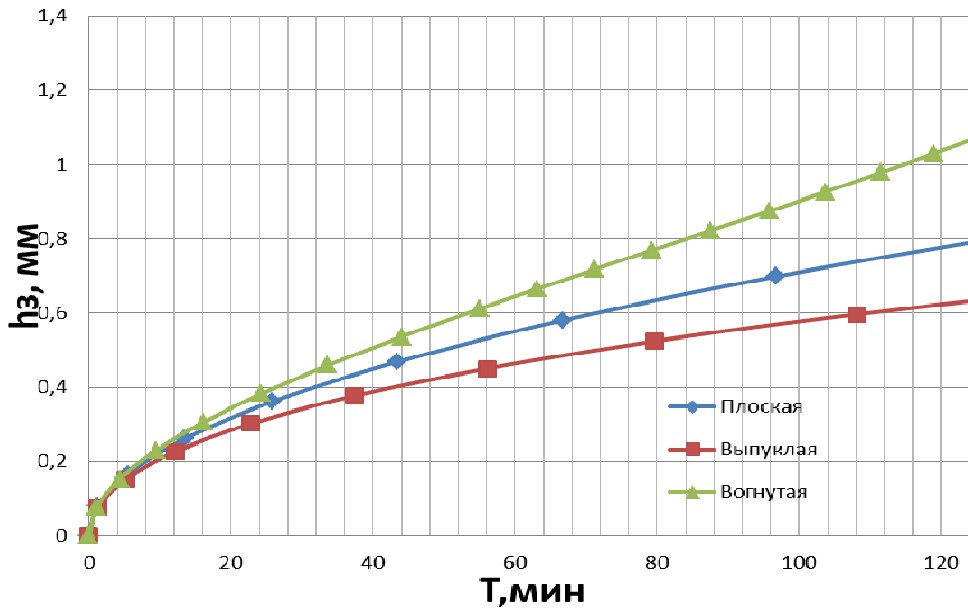


Рис. 6. Расчетные кривые износа режущих пластин с различной геометрией задней поверхности ($\alpha = 15^\circ$, $\gamma = -8^\circ$, $R = 3$ мм)

Анализ кривых износа показывает, что выпуклая форма задней поверхности позволяет существенно повысить износостойкость инструмента. Стойкость пластины с радиусом $R=3$ мм и начальным задним углом $\alpha = 10^\circ$ увеличивается в 2 раза по сравнению со стойкостью пластины со стандартной геометрией. Чем меньше радиус кривизны поверхности, тем выше период стойкости пластины.

Ограничивающим фактором при выборе формы и величин геометрических параметров задней поверхности является прочность режущего лезвия пластины. Для реальных условий резания наиболее эффективной является комбинированная форма задней поверхности, которая состоит из набора элементарных поверхностей с различной геометрией. Применительно к дисковым фрезам, оснащенным негативными тангенциальными пластинами, может быть рекомендована геометрия задней поверхности, состоящая из прямолинейного участка длиной l , выпуклой и вогнутой поверхностей с радиусами R_1 и R_2 , отстоящих от режущей кромки на расстоянии, не превышающем величину критического износа $h_{кр}$ (рис. 7). Заднюю поверхность

пластины такой формы можно назвать комбинированной укороченной поверхностью.

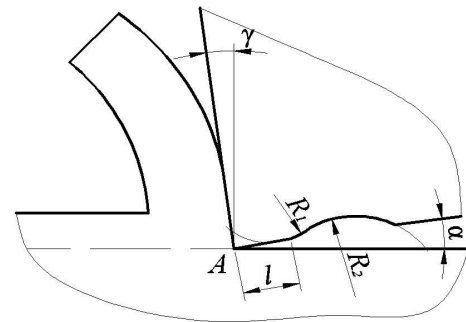


Рис. 7. Схема резания пластиной с комбинированной задней поверхностью

Особенности изнашивания сменных пластин с комбинированной задней поверхностью изучались с помощью полученных выше моделей. Износостойкость пластин оценивалась в сравнении со стандартными пластинами с прямолинейной задней поверхностью. Расчетные кривые износа пластин применительно к операции фрезерования рельсов показаны на рис. 8.

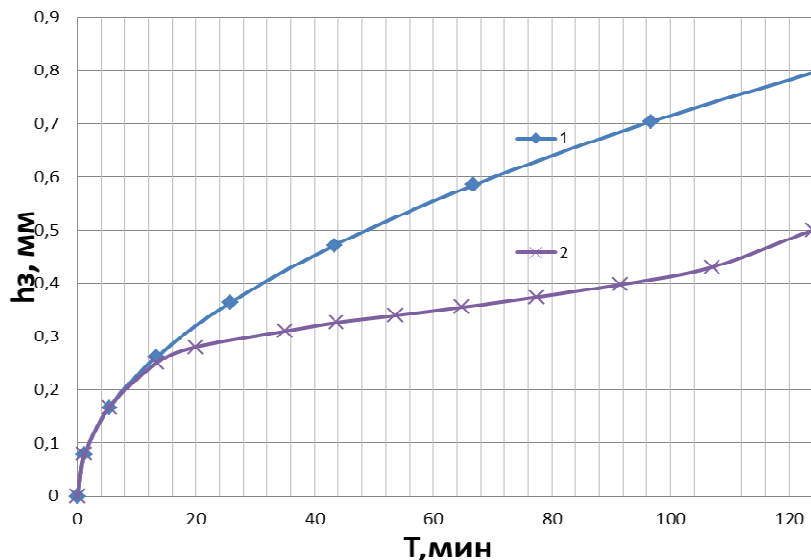


Рис. 8. Расчетные кривые износостойкости пластин с комбинированной (2) и плоской (1) формами задней поверхности ($C = 0,027$, $l = 0,25$ мм, $R_1 = 1$ мм, $R_2 = 2$ мм, $\alpha = 8^\circ$, $\gamma = -8^\circ$)

На графиках кривая 1 соответствует пластине с плоской задней гранью, кривая 2 – пластине со сложной геометрией задней поверхности, состоящей из сопрягающихся между собой прямолинейного участка длиной $l=0,25$ мм, выпуклой и вогнутой поверхностями с радиусами $R_1=1$ мм и $R_2=2$ мм. Задний угол у обеих пластин составлял 8 градусов. Из графиков видно, что при работе пластинами с комбинированной задней поверхностью меняется ха-

Разработка конструкции тангенциальных пластин с комбинированной формой задней поверхности повышенной износостойкости

Предложенный метод повышения износостойкости инструмента использован при разработке новых конструкций тангенциальных режущих пластин SNEX 1207AN (рис. 9) и SNEX 1207AN-15, предназначенных для фрезерования железнодорожных рельсов [4].

Сменные многогранные режущие пластины имеют передние поверхности 1, задние поверхности 2, режущие кромки 3, упрочняющие фаски на передней поверхности 4. На задних гранях пластины 2 вдоль режущих кромок 3 выполнены углубления в виде канавок 5, уменьшающие заднюю поверхность лезвия инструмента, контактирующую в процессе резания с поверхностью обрабатываемой заготовки. Канавки 5, ограничивающие заднюю поверхность 2 пластины, отстоят от

раक्टर износа. В начальный период резания кривые износа пластин совпадают. После достижения углубления интенсивность нарастания износа пластины уменьшается. Темп изнашивания dh_z/dT инструмента с укороченной задней поверхностью зависит от формы и размеров углубления. Расчеты показывают, что применение фрезерных пластин с комбинированной задней поверхностью позволяет в разы увеличить стойкость инструмента.

режущих кромок на расстоянии l , не превышающем величину предельно допустимой ширины фаски износа по задней грани

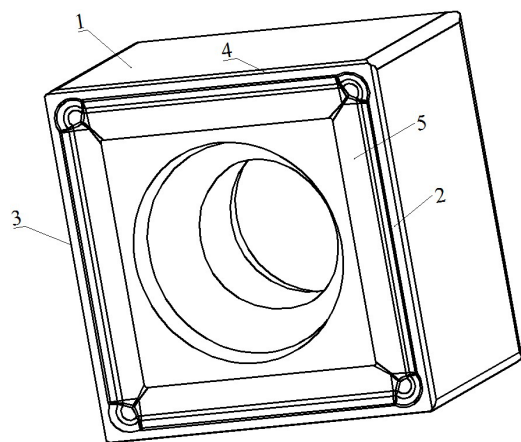


Рис. 9. Новая конструкция тангенциальной режущей пластины с прямолинейной режущей кромкой SNEX 1207AN

$h_{кр}$. Форма поперечного сечения канавки изменяется от выпуклой с радиусом R_1 до вогнутой с радиусом R_2 по мере удаления от режущей кромки 3. С учетом технологических особенностей фрезерования рельсов канавки расположены на удалении $l = 0,2 \dots 0,35$ мм от режущих кромок. Чем выше прочность режущей пластины, тем ближе к режущей кромке располагается канавка.

Опытные образцы пластин SNEX 1207AN и SNEX 1207AN-15 были изготовлены на Кировградском заводе твердых сплавов из материала TP35 с различными видами PVD-покрытий.

Производственные испытания пластин SNEX 1207AN и SNEX 1207AN-15 проводились на рельсосварочном предприятии № 18 ОАО «РЖД». Условия проведения испытаний: обрабатываемые рельсы – рельсы Р65 из специальной стали, бывшие в эксплуатации; оборудование – рельсофрезерный станок РФС 6992М; инструмент – профилирующая фреза диаметром 560 мм производства «СКИФ-М». Режимы резания: скорость $v = 180$ м/мин, глубина $t = 0,3 \dots 0,6$ мм, подача $s = 3 \dots 8$ м/мин, фрезерование без охлаждения. Стойкость оценивалась по количеству обработанных рельсов длиной 25 м. Критерий затупления пластины – появление

прижогов и рисок (задиrow) на обработанной поверхности рельсов. Пластины сравнивались по работоспособности с пластинами стандартной конструкции КЗТС, а также фирм Sandvik, Pramet, Virial.

В результате испытаний выявлены существенные преимущества нового инструмента по сравнению с аналогами. Износостойкость инструмента с комбинированной задней поверхностью многократно увеличивается при практически неизменной прочности лезвия пластины. В процессе эксплуатации режущих пластин происходит стабилизация трения в зоне резания и снижение интенсивности роста теплового потока. При достижении величины l линейного износа h_z , его дальнейшее развитие резко уменьшается. Температура инструмента и износ h_z стабилизируются. Рост фаски износа в процессе резания уменьшается, а время работы инструмента до критического износа продлевается. Уменьшение температуры резания снижает вероятность прижогов, что благоприятно сказывается на качестве обработанной поверхности рельсов. Эффект от оптимизации конструкции задней поверхности ярко иллюстрируют сравнительные фотографии износа стандартных и новых пластин после обработки одинакового количества рельсов (рис. 10).

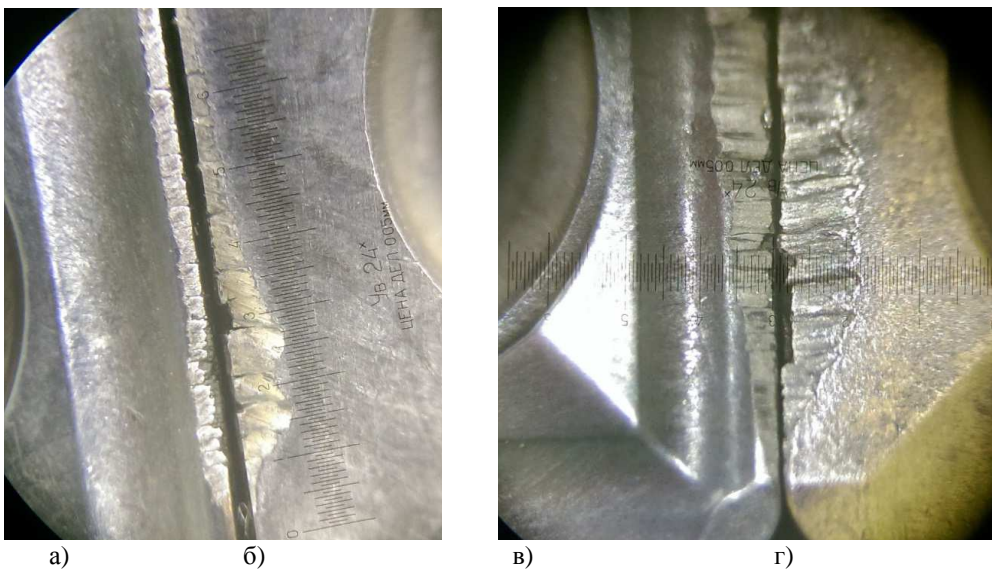


Рис. 10. Сопоставление износа пластин с криволинейной задней поверхностью (а, в) и стандартных пластин (б, г): а - SNEX 1207AN-TL; б - SNEX 1207AN; в - SNEX 1207AN-15TL; г - SNEX 1207AN-15 (марка сплава – TP 35AM)

Хорошо видно, что на пластинах с криволинейной задней поверхностью SNEX 1207AN-TL и SNEX 1207AN-15TL износ распределен более равномерно вдоль активного участка режущей кромки, а величина фаски износа существенно меньше,

чем у стандартных пластин SNEX 1207AN и SNEX 1207AN-15, изготовленных из одного и того же твердого сплава.

Результаты сравнительных стойкостных испытаний пластин разных фирм представлены в виде диаграмм на рис. 11.

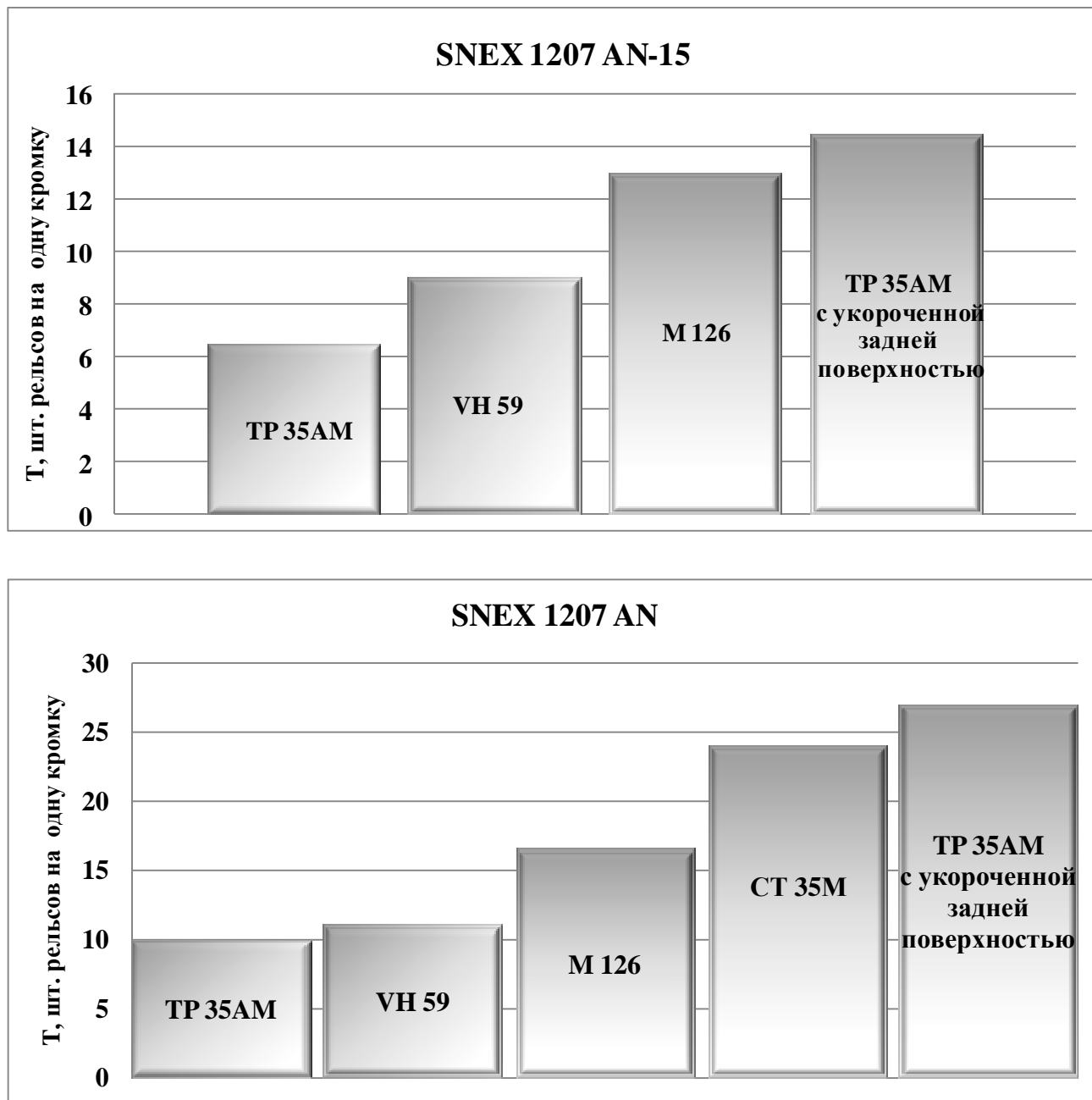


Рис. 11. Результаты сравнительных испытаний работоспособности пластин SNEX 1207AN-TL и SNEX 1207 AN-15 TL: TP 35AM – КЗТС; VH 59 – Вириал; M 126 – АЛГ-Pramet; CT 35M – Sandvik - МКТС

Обработка экспериментальных данных показала, что стойкость новых пластин SNEX 1207AN-TL и SNEX 1207AN-15 TL превысила стойкость применяемых в настоящее время отечественных пластин

в 2,5 раза, импортных - на 30%. При повышенных функциональных свойствах пластин их стоимость выгодно отличается от применяемых сегодня зарубежных аналогов.

Выводы:

1. Разработана методика сравнительной оценки износостойкости задних поверхностей инструмента различной формы.

2. Установлена возможность и высокая эффективность управления динамикой износа инструмента при чистовом фрезе-

ровании путем изменения геометрической формы задней поверхности.

3. Предложена новая конструкция сменных тангенциальных пластин с комбинированной формой задней поверхности, позволяющая существенно увеличить ресурс инструмента без ухудшения качества обрабатываемой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский, Г.И. Резание металлов: учеб. для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский.– М.: Высш. шк., 1985.– 304 с.
2. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А.Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

1. Granovsky, G.I., Granovsky, V.G., Metal Cutting: Text-book for Engineering and Instrument-making Colleges / G.I. Granovsky, V.G. Granovsky.– М.: Higher School, 1985.– pp. 304.
2. Reznikov, A.N., Heat Processes in Technological Systems / A.N. Reznikov, L.A. Reznikov. – М.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 288.

3. Креймер, Г.С. Прочность твердых сплавов / Г.С. Креймер.– М.: Metallургия, 1966.– 200 с.
4. Пат. 154601 РФ, МПК В23С 5/20. Сменная тангенциальная многогранная режущая пластина / Михайлов С. В., Михайлов А. С., Сильченко В. И.– № 2014142404/02; заявл. 21.10.14; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.

3. Kreimer, G.S., Hard Metal Strength / G.S. Koimer. – М.: Metallurgy, 1966.– pp. 200.
4. Pat. 154601 RF, IPC B23C 5/20. Replaceable Tangential Cutting Insert / Mikhailov, S.V., Mikhailov, A.S., Silchenko, V. I.– № 2014142404/02; declared. 21.10.14; published. 27.08.2015, Bulletin № 24.

Статья поступила в редколлегию 11.01.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Костромского государственного технологического университета Петровский В.С.

Сведения об авторах:

Михайлов Станислав Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Костромского государственного технологического университета, e-mail: michsv@yandex.ru.

Mikhailov Stanislav Vasilievich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Engineering Techniques” State Technological University of Kostroma, e-mail: michsv@yandex.ru.

Михайлов Александр Станиславович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Костромского государственного технологического университета, e-mail: alexmich7@gmail.com.

Mikhailov Alexander Stanislavovich, Post graduate student of the Dep. “Engineering Techniques” State Technological University of Kostroma, e-mail: alexmich7@gmail.com.