

РАЗРАБОТКА УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20

© 2016 г. **В.В. Мыльников, А.И. Пронин, А.Д. Романов**

Нижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексева
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет (КнАГТУ)

Статья поступила в редакцию 18.07.14 г., доработана 19.12.14 г., подписана в печать 20.10.15 г.

Рассмотрены технологические принципы повышения работоспособности концевых фрез, выполненных из быстрорежущей стали Р6М5К5, путем упрочнения режущей части этих фрез ионным азотированием и комплексного упрочнения (ионное азотирование и нанесение композиционного износостойкого покрытия на основе нитридов металлов). Для оптимизации режимов азотирования проведены испытания на стойкость партии фрез. Выбран оптимальный режим упрочнения, обеспечивающий наибольшую стойкость концевых фрез при обработке титанового сплава VT20. На основе экспериментальных данных о влиянии состава покрытий на стойкость концевых фрез предложены составы износостойких покрытий. Установлено влияние режимов резания на стойкость упрочненного инструмента. Проведен теоретический анализ результатов испытаний работоспособности упрочненного режущего инструмента.

Ключевые слова: титановый сплав, упрочнение инструмента, износ, стойкость, ионное азотирование, оптимальная скорость резания, концевая фреза, износостойкое покрытие, дислокации, микротрещины.

Мыльников В.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, технологии материалов и термической обработки металлов НГТУ (603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, 24). E-mail: mrmylnikov@mail.ru.

Пронин А.И. — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения КнАГТУ (681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27). E-mail: alex.pronin2011@mail.ru.

Романов А.Д. — зав. лабораторией НГТУ. E-mail: mrmylnikov@mail.ru.

Для цитирования: Мыльников В.В., Пронин А.И., Романов А.Д. Разработка упрочняющих технологий для повышения эффективности резания титанового сплава VT20 // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 3. С. 40–47.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-40-47.

Mylnikov V.V., Pronin A.I., Romanov A.D.

Development of hardening technologies to improve performance of VT20 titanium alloy cutting

Technological principles to improve performance of end mills made of R6M5K5 high-speed steel are considered by hardening of their cutting edges with ion nitriding as well as by complex hardening (ion nitriding and application of composite wear-resistant coating based on metal nitrides). A batch of mills was tested for resistance to optimize the nitriding conditions. The optimum hardening mode that provides the highest resistance of end mills in the processing of VT20 titanium alloy was chosen. The compositions of wear-resistant coatings were proposed according to the experimental data of their effect on the end mill resistance. The impact of cutting conditions on the hardened tool resistance was determined. A theoretical analysis was performed as regards the results of hardened cutter performance tests.

Keywords: titanium alloy, tool hardening, wear, resistance, ion nitriding, optimum cutting speed, end mill, wear-resistant coating, dislocations, microcracks.

Mylnikov V.V. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of materials science, technology of materials and heat treatment of metals, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NSTU) (603950, N. Novgorod, Minin str., 24). E-mail: mrmylnikov@mail.ru.

Pronin A.I. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of technology of mechanical engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (KASTU) (681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27). E-mail: alex.pronin2011@mail.ru.

Romanov A.D. — head of the laboratory of NSTU. E-mail: mrmylnikov@mail.ru.

Citation: Mylnikov V.V., Pronin A.I., Romanov A.D. Razrabotka uprochnyayushchikh tekhnologii dlya povysheniya effektivnosti rezaniya titanovogo splava VT20. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 3. P. 40–47.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-40-47.

Введение

Проблема обрабатываемости титановых сплавов (ТС) привлекает внимание достаточно большого количества исследователей как в нашей

стране, так и за рубежом. Достаточно сказать, что широкое их применение вместо алюминиевых и магниевых сплавов привело в авиационной про-

мышленности в настоящее время к увеличению трудоемкости механической обработки примерно в 10 раз, а потребность в режущем инструменте возросла в 10—15 раз. Вопрос обрабатываемости ТС встает еще более остро в связи с широким использованием для этих целей станков с числовым программным управлением.

Наибольшей сложностью отличаются черновая обработка заготовок, покрытых окалиной или литейной коркой, обработка отверстий малого диаметра, нарезание резьбы и финишная обработка. Трудности финишных операций заключаются в обеспечении производительной обработки наряду с достижением необходимого качества поверхностного слоя деталей, при котором не снижались бы прочность и эксплуатационные характеристики.

До настоящего времени причины низкой обрабатываемости сплавов на основе титана продолжают оставаться малоизученными. Исследованиями ряда авторов установлено, что в зоне резания этих сплавов высокие температуры значительно превышают температуры, возникающие при обработке сталей [1—7].

Характерной особенностью для ТС является исключительно малая величина коэффициента усадки стружки. Во многих работах отмечена и «отрицательная усадка» стружки, объясняемая либо газонасыщением, либо малой пластичностью титановых сплавов, приводящей к резко сегментной стружке. В зоне резания ТС из-за их низкой теплопроводности возникает высокая температура. Это обстоятельство усугубляется наличием малой усадки стружки, что обуславливает повышение скорости ее движения по передней поверхности инструмента, рост работы трения и увеличение количества теплоты, выделяющейся на поверхности контакта [8—10].

Среди основных причин низкой обрабатываемости ТС следует отметить повышенную тенденцию свариваемости стружки с режущим инструментом. Схватывание стружки с инструментом приводит к тому, что при повторном врезании режущего инструмента от него отделяются частицы инструментального материала [8, 11].

Отметим еще одну характерную особенность титановых сплавов — исключительно высокую активность при повышенных температурах к кислороду и азоту воздуха. Взаимодействие с ними титана в процессе резания влечет охрупчивание срезаемого и остывающего слоев материала, с

упрочнением слоев связан более интенсивный износ режущего инструмента.

Механизм влияния газов в титановых сплавах на их обрабатываемость и усиленный износ инструмента рассматривался в ряде работ [7, 12, 13]. Повышение содержания газов приводит к снижению пластичности сплава и за счет этого — к возрастанию силы резания и давления на переднюю поверхность режущего инструмента, возникновению вибрации.

Перспективными направлениями повышения износостойкости инструментальных материалов являются разработка и освоение новых технологических методов комплексного упрочнения их рабочих поверхностей с помощью нанесения композиционных износостойких покрытий на базе нитридных, карбидных, карбонитридных, оксидных, боридных соединений тугоплавких металлов IV—VI групп Периодической системы элементов. Эти металлы, образуя износостойкую композицию и обладая высокой твердостью, износостойкостью, энергоемкостью, химической стабильностью, малой теплопроводностью, способствуют повышению работоспособности режущего инструмента [8, 14, 15].

Поэтому цель настоящей работы — исследование влияния конструкции многослойного износостойкого покрытия, наносимого на концевые фрезы из быстрорежущей стали, на их работоспособность при обработке титанового сплава ВТ20.

Методика проведения исследования

Для проведения испытаний на стойкость была использована партия концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5К5 (ГОСТ 23248-78, тип 2, с крупным зубом, $D = 14$ мм, $l = 53$ мм — диаметр и длина рабочей части концевых фрез, $L = 132$ мм — длина фрезы), аналогичных применяемым для обработки деталей из высокопрочных сталей и титановых сплавов в авиационном производственном объединении (КнААПО, г. Комсомольск-на-Амуре) на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Испытания проводили при фрезеровании титанового сплава ВТ20 на станке 6М13ГН-1Н (вертикально-фрезерный с ЧПУ). Режимы резания: скорость (V) — 27,7 м/мин, подача (S) — 0,05 мм/зуб, глубина (t) — 3 мм, ширина фрезерования — 20 мм, смазочно-охлаждающее технологическое средство — РЗ-СОЖ8 (ТУ 38-101258-74). Критерием работоспособности

было время работы инструмента до износа по заданной поверхности 0,3 мм.

Было осуществлено комплексное упрочнение части фрез — ионное азотирование (ИА) и ИА с нанесением композиционного износостойкого покрытия на основе нитридов металлов IV–VI групп Периодической системы элементов.

Постоянными параметрами при проведении ИА были давление в рабочей камере установки (0,13 Па) и напряжение на подложке (инструменте) и аноде (120 В); упрочнение проводилось в режиме несамостоятельного разряда (переключающегося с помощью датчика с анода на подложку при достижении инструментом заданной температуры). Изменяемыми параметрами являлись ток, подаваемый на подложку ($I_{\text{п}}$, А); ток, подаваемый на анод ($I_{\text{а}}$, А); температура нагрева инструмента (θ , °С).

Чистая обезжиренная концевая фреза помещалась в камеру установки «Булат 6». Из камеры откачивался воздух ($P = (5,3 \div 1,3) \cdot 10^{-3}$ Па), напускался азот до $P = 0,13$ Па, производилась чистка поверхности инструмента тлеющим разрядом. По окончании чистки камеру откачивали до 0,013 Па и подавали напряжение на катод 120 В. При $I_{\text{п}} = 50 \div 80$ А на поверхность инструмента в течение 7–9 мин осаждался слой чистого металла катода, затем в камеру напускался азот до давления 0,13 Па и на поверхность инструмента наносился слой необходимой толщины нитрида металла катода (либо катодов, если требовалось композиционное покрытие из двух или трех нитридов).

Результаты исследований

Для выявления оптимального вида упрочнения, состава износостойкого покрытия и оптимизации режимов резания при обработке титанового

сплава ВТ20 проводились испытания на стойкость инструмента, подвергнутого различным видам упрочнения, для сравнения его работоспособности.

Параметры режимов ИА и показатели стойкости режущего инструмента приведены в таблице.

Было установлено, что при обработке титанового сплава ВТ20 самым оптимальным режимом ИА-упрочнения инструмента является режим 6, обеспечивающий увеличение относительной стойкости инструмента, по сравнению с базовым (в состоянии поставки), в 1,86 раза (см. таблицу).

С учетом полученных результатов произведено комплексное упрочнение концевых фрез:

- ИА (режим 6) + однослойное износостойкое покрытие;
- ИА (режим 6) + двухслойное износостойкое покрытие;
- ИА (режим 6) + четырехслойное износостойкое покрытие.

Гистограммы относительной стойкости инструмента, построенные по результатам испытаний, приведены на рис. 1.

Было установлено, что нанесение однослойного износостойкого покрытия на предварительно упрочненный путем ионного азотирования инструмент значительного повышения стойкости не дает, по сравнению с оптимальным режимом ИА-упрочнения (см. рис. 1, а). Максимальная стойкость достигалась в случае покрытия на основе нитрида циркония—гафния (81 мин), чуть меньше — нитрида циркония (76 мин). Коэффициент повышения стойкости (K) увеличивался с 1,86 до 2,25 и 2,1 соответственно.

Самыми оптимальными при использовании двух- и четырехслойных износостойких покрытий являются комбинации упрочнений с покрытиями

Режимы ионного азотирования и их влияние на стойкость концевых фрез

Режим упрочнения	$I_{\text{п}}$, А	$I_{\text{а}}$, А	θ , °С	Стойкость инструмента (T), мин	Коэффициент повышения стойкости (K)
Базовый				36	1,0
1	80	100	450	46	1,3
2	60	80	450	55	1,5
3	50	70	450	38	1,05
4	70	90	300	24	0,66
5	70	90	400	46	1,3
6	70	90	500	67	1,86
7	70	90	550	45	1,25

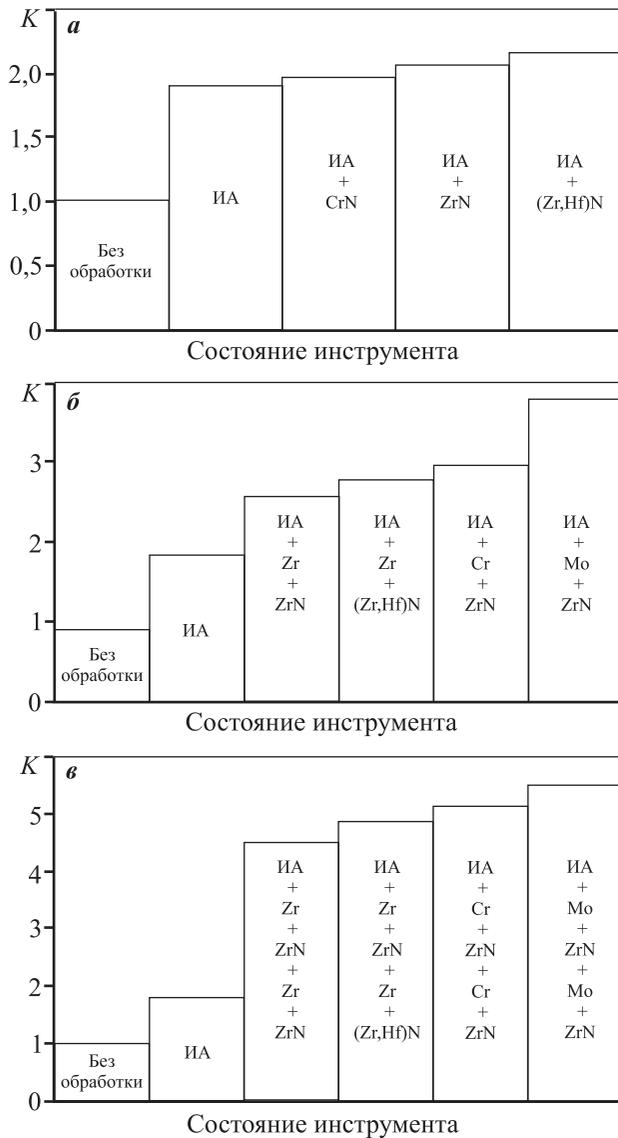


Рис. 1. Гистограммы относительной стойкости концевых фрез Р6М5К5 до и после различных этапов упрочнения
a – ионное азотирование + однослойное износостойкое покрытие;
б – ИА + 2-слойное покрытие; *в* – ИА + 4-слойное покрытие;
K = 1 соответствует стойкости концевой фрезы Р6М5К5 в состоянии поставки (36 мин)

на основе мягких слоев молибдена (см. рис. 1, б, в). Стойкость инструмента увеличивается до 3,5 раз при 2-слойном (125 мин) и до 5,5 раз при 4-слойном (199 мин) комбинированном упрочнении.

Для оптимизации режимов резания было исследовано влияние параметров режимов резания на стойкость инструмента, а также целесообразность их повышения. На рис. 2 приведены результаты испытаний на стойкость комплексно-упрочненных концевых фрез для сравнения их работоспособности при обработке титанового сплава ВТ20.

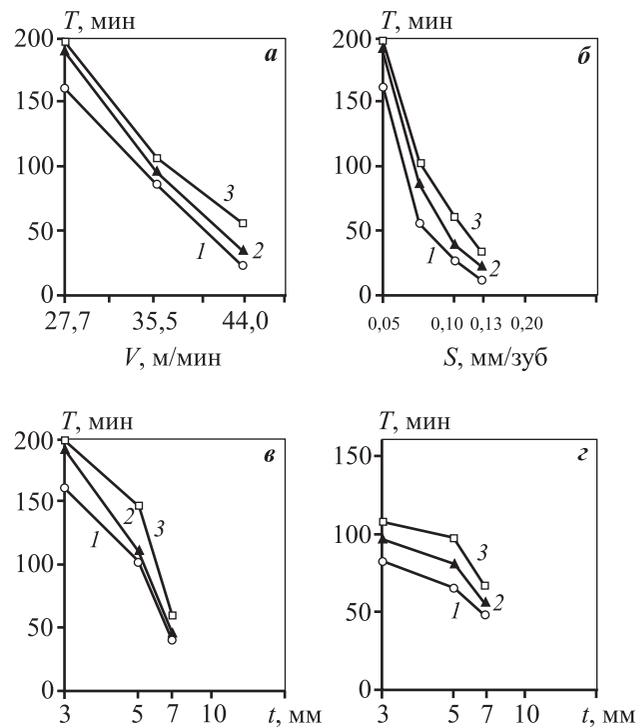


Рис. 2. Зависимость стойкости (*T*) упрочненных концевых фрез от *V* – скорости резания (*a*), *S* – подачи на зуб (*б*) и *t* – глубины резания (*в, з*)
 1 – ИА + Zr + ZrN + Zr + ZrN; 2 – ИА + Cr + ZrN + Cr + ZrN;
 3 – ИА + Mo + ZrN + Mo + ZrN
a – *t* = 3 мм, *S* = 0,05 мм/зуб
б – *t* = 3 мм, *V* = 27,7 м/мин
в – *S* = 0,05 мм/зуб, *V* = 27,7 м/мин
з – *S* = 0,05 мм/зуб, *V* = 35,2 м/мин

Обсуждение результатов

При оптимизации параметров ионного азотирования был определен режим, обеспечивающий максимальную стойкость инструмента при фрезеровании титановых сплавов (см. б в таблице). Этот режим относится к низкотемпературному азотированию и соответствует по температурному параметру данным, приводимым в литературе [16]. Лучшая работоспособность инструмента, подвергнутого ионному азотированию, по сравнению с процессами жидкостного и газового азотирования, объясняется, по-видимому, различием в характере диффузионных процессов. При ИА не наблюдается укрупнение приграничных карбидов и значительно подавляется образование карбидной сетки по границам первичных аустенитных зерен, что снижает вероятность распространения трещин вдоль указанных границ и хрупкого разрушения инструмента под воздействием весьма значительных механических нагрузок, характер-

ных для обработки титановых сплавов. Механизм зарождения и роста трещин в покрытии и инструментальной матрице следует связывать с реализацией упругопластической деформации поверхностных слоев инструмента вследствие больших тепловых и механических нагрузок. Деформация при внешнем трении поверхностных слоев инструмента и обрабатываемой заготовки вызывает образование и перемещение дислокаций под действием касательных напряжений. Поскольку каждый акт образования дислокаций повышает энергию поверхностных слоев, то микроразрушение (изнашивание) контактных поверхностей инструмента из быстрорежущей стали следует рассматривать, основываясь на структурно-энергетической теории разрушения металлов [17, 18]. Энергетически неустойчивое состояние контактных поверхностей, стремление системы трения «инструмент — обрабатываемая заготовка» при резании к уменьшению свободной энергии стимулируют протекание физико-химических процессов, что резко снижает их сопротивление изнашиванию инструмента. Указанные процессы протекают лишь при определенных условиях, а именно при определенном уровне накопления энергии и повреждений в деформируемых микрообъемах инструментального материала. Для оптимальных условий резания характерны более высокие термодинамическая стабильность и энергоемкость поверхностных слоев.

В условиях прерывистого резания, в результате воздействий переменных тепловых и механических нагрузок, микротрещины в покрытии образуются в первые минуты резания. Благодаря запасаемой энергии трещины из покрытия начинают прорастать в подложку, где развиваются до магистральных, в результате происходит разрушение микро- и макрообъемов инструментального материала [19—21].

Известно, что работоспособность инструмента из быстрорежущих сталей при достаточно высоких скоростях резания определяется способностью быстрорежущей стали сопротивляться необратимым, динамически протекающим рекристаллизационным процессам вблизи задней поверхности. Азотированный слой тормозит движение дислокаций за счет взаимодействия последних с атомами азота и дисперсионными выделениями нитридов, что связано с необходимостью дополнительной затраты энергии. Колонии вторых фаз (дисперсные выделения нитридов) изменяют условия пластической деформации и последующей рекристалли-

зации в объемах матрицы, примыкающих к этим колониям. При нагреве зародыши рекристаллизации в этих участках формируются раньше, чем в других объемах материала, что приводит к рассеянию текстуры рекристаллизации.

Покрытие представляет собой весьма энергоемкие структуры, обладающие возможностью запасать большие величины энергии деформации. Диффузионный слой является препятствием для свободного выхода дислокаций на поверхность, вследствие чего тормозятся распространение возникших в покрытии микротрещин и развитие пластических деформаций в микрообъемах поверхностного слоя. Остаточные напряжения препятствуют возникновению микротрещин в азотированном слое, перемещая место зарождения микротрещин под слой азотирования.

В работе [22] указывается, что диффузионное насыщение приводит к изменению объемных свойств материалов. В условиях ползучести и усталости диффузионный слой влияет на кинетику разрушения металлов в связи с тем, что при поверхностном легировании вероятность зарождения микротрещин на поверхности металла уменьшается. Это обусловлено изменением энергетического состояния поверхностного слоя — повышением его термодинамической стабильности в результате аннигиляции вакансий, а потому более полной реализации сил межатомной связи. Диффузионный слой в то же время тормозит выход дислокаций на поверхность и поэтому препятствует распространению возникших микротрещин.

Разрушение может протекать мгновенно, когда очаг разрушения возникает в нитридной зоне диффузионного слоя — более хрупкой, чем матрица. Однако этого не происходит, так как при азотировании возникают остаточные напряжения сжатия, которые при усталостном разрушении приводят к перемещению места зарождения трещин под диффузионный слой, оказывающий тормозящее влияние на распространения трещин.

Если разрушение начинается под слоем в более пластичной матрице, то оно сопровождается микропластической деформацией, которая распространяется к поверхности и в сердцевину образца. При этом, как уже отмечалось выше, диффузионный слой оказывает тормозящее влияние на распространение возникших микротрещин.

Кроме того, входящие в нитридную зону нитриды легирующих элементов типа CrN, MoN, WN имеют более высокую энергоемкость по сравне-

нию с соответствующими карбидами, что также препятствует зарождению микротрещин на контактных поверхностях азотированного режущего инструмента.

Таким образом, повышение работоспособности инструмента после ионного азотирования обусловлено следующими основными причинами: повышение термодинамической стабильности и энергоемкости контактных поверхностных слоев инструмента; изменение кинетики разрушения поверхностных слоев инструмента; замедление рекристаллизационных процессов в быстрорежущей стали, что снижает ее преждевременное разрушение.

Рассмотрим результаты испытаний инструмента с комбинированным упрочнением. В поверхностном слое инструмента, подвергнутого комплексному упрочнению, подводимая энергия делится на две части: одна расходуется на разрушение азотированного слоя, другая — на разрушение материала под азотированным слоем. Причем если для неупрочненного инструмента процесс разрушения локализован в довольно тонких поверхностных слоях, то для упрочненного инструмента глубина слоя, в котором инициируются процессы разрушения, гораздо больше и в общем случае, вероятно, включает в себя и покрытие, и азотированный слой, и часть материала под ним. Таким образом, удельная энергия деформации, приходящаяся на элементарный объем инструментального материала, для упрочненного инструмента будет меньше, что в сочетании с лучшими термодинамическими свойствами упрочненного поверхностного слоя обеспечивает повышенную работоспособность инструмента после комплексной обработки.

Следует отметить незначительное повышение стойкости инструментов с комбинированным упрочнением, включающим однослойные покрытия, по сравнению с инструментом, упрочненным только ионным азотированием (см. рис. 1, *а*). Полученный результат объясняется следующим образом: в процессе работы инструмента, вследствие затрудненного перемещения дислокаций в азотированном слое, происходит появление микротрещин расслаивания, прорастающих из покрытия в матрицу по границе раздела «покрытие — инструментальный материал», что приводит к отслаиванию покрытия.

Введение в конструкцию износостойкого покрытия слоя чистого металла IV–VI групп более значительно повышает работоспособность инструмента с комбинированным упрочнением вследствие торможения трещин в мягком слое и увеличения адгезионной связи покрытия с инструментальным материалом, способствующей размыванию границы покрытие—матрица. Максимальное повышение стойкости инструмента наблюдается при использовании в качестве материала мягкого слоя молибдена (см. рис. 1, *б*).

Увеличение числа слоев износостойкого покрытия ведет к повышению стойкости инструмента вследствие наличия высоких диссипативных свойств конструкции композиционного покрытия, обеспечивающего рассеяние подводимой энергии на межфазных границах и в мягких слоях. Так, испытания 4-слойных износостойких покрытий показали возрастание стойкости инструмента до 5,5 раз (см. рис. 1, *в*).

По результатам оптимизации режимов резания инструмента с комбинированным упрочнением следует отметить следующее: лучшее соотношение повышения производительности (в 1,7 раза) к уменьшению стойкости (в 1,4 раза) соответствует режимам с увеличенными глубинами резания при расчетных значениях подачи и скорости резания (см. рис. 2, *в*). Хорошие результаты также получены при возрастании глубины резания до 5 мм и скорости резания до 35,2 м/мин (см. рис. 2, *д*), — достигается повышение производительности, по отношению к расчетным (базовым) режимам, в 2,2 раза при снижении стойкости инструмента в 2 раза (см. рис. 2, *е*). Неплохие результаты наблюдаются при 30 %-ном повышении скорости резания, 40 %-ном увеличении подачи и 130 %-ном росте глубины резания (см. рис. 1, *в* и рис. 2, *а*, *2, в*). Значительно худшие результаты дает 100 %-ное увеличение подачи (см. рис. 2, *б*). Худшие результаты отмечены при повышении скорости резания свыше 30 % (см. рис. 2, *а*). Негативные результаты можно объяснить резким увеличением температуры и количества энергии, подводимой к инструменту, что ведет к распаду нитридов азотированного слоя и разрушению поверхности инструмента.

Следует также отметить, что наилучшие результаты среди исследуемых покрытий в каждом конкретном случае показало покрытие $Mo + ZrN + Mo + ZrN$, что, несомненно, следует связать с использованием молибдена в качестве подслоя чистого металла. Данный факт объясняется лучшей взаимной растворимостью молибдена в инструментальной матрице и нитридном покрытии.

Выводы

1. Для максимального использования комбинированного упрочнения необходимо нанесение многослойных покрытий с промежуточным слоем из чистого металла IV–VI группы Периодической системы элементов.

2. Лучшую работоспособность при механической обработке титанового сплава ВТ20 имеет инструмент с комбинированным покрытием с подслоем молибдена, нанесенным после предварительной химико-термической обработки (ионного азотирования).

3. Максимальное влияние на стойкость режущего инструмента при обработке титанового сплава ВТ20 оказывают скорость, затем подача и глубина резания. Допустимо повышать эти показатели, соответственно, не более чем на 30 % (*V*), 100 % (*S*) и 130 % (*f*); следует отметить, что целесообразно совместное увеличение скорости резания — до 30 % и подачи — до 40 %.

4. Выбор тех или иных режимов резания следует назначать исходя из условий и требований технологического процесса непосредственно в производственных условиях при обработке изделий из титанового сплава ВТ20 вышеупомянутым инструментом.

Литература

1. *Ezugwu E.O., Wang Z.M.* Titanium alloys and their machinability: A review // *J. Mater. Process. Technol.* 1997. Vol. 68. P. 262–274.
2. *Ginting A., Nouari M.* Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006. Vol. 46. P. 758–768.
3. *Subramanian S.V., Ingle S.S., Kay D.A.R.* Design of coatings to minimize tool crater wear // *Surf. Coat. Technol.* 1993. Vol. 61. P. 293–299.
4. *Komanduri R., Turkovich B.F.V.* New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys // *Wear.* 1981. Vol. 69. P. 179–188.
5. *Nouari M., Makich H.* Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti–6Al–4V and Ti–555 // *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* 2013. Vol. 41. P. 259–269.
6. *Ginting A., Nouari M.* Optimal cutting conditions when dry end milling the aeroengine material Ti–6242S // *J. Mater. Process. Technol.* 2007. Vol. 184. P. 319–324.
7. *Кривоухов В.А., Чубаров Л.Д.* Обработка резанием титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1970.
8. *Кабалдин Ю.Г.* Исследование прочности сцепления стружки с инструментом // *Станки и инструмент.* 1973. No. 4. С. 36–37.
9. *Eugene R.L.* Tooling structure: interface between cutting edge and machine tool // *Keynote papers WSUD USA. Ann. CIRP.* 2000. Vol. 49(2). P. 591–634.
10. *Narutaki N., Murakoshi A., Motonishi S., Takeyama H.* Study on machining of titanium alloys // *Ann. CIRP.* 1983. Vol. 32(1). P. 591–634.
11. *Rahman M., Wong Y.S., Zareena A.R.* Machinability of titanium alloys // *JSME Int. J. Ser. C.* 2003. Vol. 46(1). P. 107–115.
12. *Жучков Н.С., Беспяхотный П.Д.* Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1989.
13. *Sato H.* Mechining of titanium alloys // *Kinzoku.* 1982. Vol. 52. No. 3. P. 58–66.
14. *Мыльников В.В., Пронин А.И., Чернышов Е.А.* Повышение работоспособности концевых фрез // *Международ. журн. прикл. и фундамент. исследований.* 2013. No. 10 (ч. 2). С. 227.
15. *Верещака А.С., Верещака А.А., Савушкин Г.Ю., Сивенков А.С.* Многослойные наноструктурированные покрытия для режущего инструмента // *Персп. материалы.* 2014. No. 5. С. 39–48.
16. *Синопальников В.А., Гурин В.Д.* Тепловые условия работы быстрорежущего инструмента с покрытием из нитрида титана // *Станки и инструмент.* 1983. No. 1. С. 14–16.
17. *Suresh S.* Fatigue of metals. Cambridge University Press, 2006.
18. *Giannakopoulos A.E., Suresh S.* Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation // *Scr. Mater.* 1999. No. 10. P. 1191–1198.
19. *Пронин А.И., Мыльников В.В., Чернышов Е.А.* Причины низкой работоспособности пластин из режущей керамики при твердом точении // *Материаловедение.* 2014. No. 5. С. 13–15.
20. *Пронин А.И., Мыльников В.В., Рожков И.И.* Повышение эффективности обработки за счет использования режущего инструмента, оснащенного упрочненными пластинами из сверхтвердых материалов и режущей керамики // *Международ. журн. прикл. и фундамент. исследований.* 2013. No. 10 (ч. 2). С. 377–380.
21. *Пронин А.И., Мыльников В.В.* Влияние различных методов упрочнения на работоспособность режущих пластин из поликристаллических сверхтвердых материалов и минералокерамики при обработке труднообрабатываемых материалов // *Технол. металлов.* 2011. No. 9. С. 36–41.

22. Кремнев Л.С., Синопальников В.А. Изменение структуры и свойств в режущей части инструмента из быстрорежущих сталей в процессе непрерывного точения // Вестн. машиностроения. 1974. No. 5. С. 63—67.
13. Sato H. Machining of titanium alloys. *Kinzoku*. 1982. Vol. 52. No. 3. P. 58—66.
14. Mylnikov V.V., Pronin A.I., Chernyshov E.A. Povyshenie rabotosposobnosti kontsevykh frez [Improving the performance of end mills]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2013. No. 10 (Pt. 2). P. 227.
15. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A., Savushkin G.Yu., Sivenkov A.S. Mnogosloynnye nanostrukturirovannye pokrytiya dlya rezhushchego instrumenta [Nanostructured multilayer coatings for cutting tools]. *Perspektivnye materialy*. 2014. No. 5. P. 39—48.

References

1. Ezugwu E.O., Wang Z.M. Titanium alloys and their machinability: A review. *J. Mater. Process. Technol.* 1997. Vol. 68. P. 262—274.
2. Ginting A., Nouari M. Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006. Vol. 46. P. 758—768.
3. Subramanian S.V., Ingle S.S., Kay D.A.R. Design of coatings to minimize tool crater wear. *Surf. Coat. Technol.* 1993. Vol. 61. P. 293—299.
4. Komanduri R., Turkovich B.F.V. New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. *Wear*. 1981. Vol. 69. P. 179—188.
5. Nouari M., Makich H. Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti—6Al—4V and Ti-555. *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* 2013. Vol. 41. P. 259—269.
6. Ginting A., Nouari M. Optimal cutting conditions when dry end milling the aeroengine material Ti-6242S. *J. Mater. Process. Technol.* 2007. Vol. 184. P. 319—324.
7. Krivoukhov V.A., Chubarov L.D. Obrabotka rezaniem titanovykh splavov [Processing by cutting of titanic alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1970.
8. Kabaldin Yu.G. Issledovanie prochnosti stsepleniya struzhki s instrumentom [Investigation of the adhesive strength of the chip with the tool]. *Stanki i instrument*. 1973. No. 4. P. 36—37.
9. Eugene R.L. Tooling structure: interface between cutting edge and machine tool. *Keynote papers WSUD USA. Ann. CIRP*. 2000. Vol. 49(2). P. 591—634.
10. Narutaki N., Murakoshi A., Motonishi S., Takeyama H. Study on machining of titanium alloys. *Ann. CIRP*. 1983. Vol. 32(1). P. 591—634.
11. Rahman M., Wong Y.S., Zareena A.R. Machinability of titanium alloys. *JSME Int. J. Ser. C*. 2003. Vol. 46(1). P. 107—115.
12. Zhuchkov N.S., Bepakhotnyi P.D. Povyshenie effektivnosti obrabotki rezaniem zagotovok iz titanovykh splavov [Increase of efficiency of processing by cutting of preparations from titanic alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1989.
16. Sinopal'nikov V.A., Gurin V.D. Teplovye usloviya raboty bystrorezhushchego instrumenta s pokrytiem iz nitrida titana [Thermal conditions of work with HSS tools coated with titanium nitride]. *Stanki i instrument*. 1983. No. 1. P. 14—16.
17. Suresh S. Fatigue of metals. Cambridge University Press, 2006.
18. Giannakopoulos A.E., Suresh S. Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation. *Scr. Mater.* 1999. No. 10. P. 1191—1198.
19. Pronin A.I., Mylnikov V.V., Chernyshov E.A. Prichiny nizkoi rabotosposobnosti plastin iz rezhushchei keramiki pri tvyerdost'nom tochenii [The reasons for the low efficiency of cutting ceramics inserts in hard-part turning]. *Materialovedenie*. 2014. No. 5. P. 13—15.
20. Pronin A.I., Mylnikov V.V., Rozhkov I.I. Povyshenie effektivnosti obrabotki za schet ispol'zovaniya rezhushchego instrumenta, osnashchennogo uprochnennymi plastinami iz sverkhтвердых материалов i rezhushchei keramiki [The increase of the processing efficiency due to the use of the cutting tool, equipped with hardened plates of superhard materials, cutting ceramics and]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2013. No. 10 (Pt. 2). P. 377—380.
21. Pronin A.I., Mylnikov V.V. Vliyaniye razlichnykh metodov uprochneniya na rabotosposobnost' rezhushchikh plastin iz polikristallicheskikh sverkhтвердых материалов i mineralokeramiki pri obrabotke trudnoobrabatyvaemykh материалов [Influence of various methods of hardening on operability of the cutting plates from polycrystalline supersolid materials and mineraloceramics when processing of the hardly processed materials]. *Tekhnologiya metallov*. 2011. No. 9. P. 36—41.
22. Kremnev L.S., Sinopal'nikov V.A. Izmeneniye struktury i svoystv v rezhushchei chasti instrumenta iz bystrorezhushchikh staley v protsesse nepreryvnogo tocheniya [Changes in the structure and properties of the cutting tool from high-speed steels during continuous turning]. *Vestnik mashinostroeniya*. 1974. No. 5. P. 63—67.