

Эффективная обработка закаленных сталей, высокопрочных и тугоплавких материалов РИ с покрытиями и упрочненными слоями

*Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
з-д «Машгидропривод»
Харьковский ун-т радиоэлектроники*

Получены режимы эффективной обработки высокопрочных и тугоплавких материалов и закаленных сталей по таким критериям: обрабатываемости, максимальному снимаемому объему материала за период стойкости, стойкости, производительности обработки и суммарному рейтингу, учитывающему все три последних критерия.

Ключевые слова: высокопрочные, тугоплавкие, конструкционные материалы, упрочненные слои, критерии, снимаемый объем материала за период стойкости, стойкость РИ, производительность обработки, суммарный рейтинг.

Введение

Материалы, используемые в современном машиностроении и авиационной технике, являются труднообрабатываемыми. Для оценки производительности и экономичности механической обработки пользуются понятием "обрабатываемость резанием".

Обрабатываемость – комплексная характеристика, включающая в себя сведения о стойкости режущего инструмента, силах резания, характере процесса деформирования, характеристиках состояния поверхностного слоя и точности обработки, теплонапряженности и виброустойчивости процесса резания и других технологических характеристиках (зависит от физико-механических свойств материалов и условий обработки). Плохо обрабатываются резанием конструкционные материалы, имеющие значительное количество карбидных и интерметаллидных включений, обладающие высокой твердостью, низкой теплопроводностью, значительной вязкостью, склонностью к адгезии и диффузии с инструментальными сталями и сплавами, а также покрытиями, используемыми для упрочнения РИ.

Кроме обрабатываемости очевидно можно предложить такие критерии: максимум снимаемого материала за период стойкости, стойкость, производительность обработки, а также объективный суммарный критерии, учитывающий все предложенные критерии с соответствующими массовыми коэффициентами.

Все вопросы, рассматриваемые в работе, важны для современного машиностроения и особенно актуальны для аэрокосмического производства, где широко используются высокопрочные, тугоплавкие материалы и закаленные стали.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые ресурсосберегающие и технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13), «Аэрокосмическая техника и транспорт» и по темам «Создание физико-технических основ повышения качества материала аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-

ионной обработки деталей аэрокосмической техники», (подсекция 6) «Материаловедение» по теме «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», а также в рамках хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Состояние вопроса

В настоящее время есть относительно небольшое количество публикации о работоспособности режущих инструментов (РИ) с покрытиями и упрочненным слоем [1–10].

Обработка сложнелегированных аустенитных жаропрочных сталей и сплавов на хромо-никель-кобальтовой основе, а также сплавов на основе W, Ti, Nb, Ni, Mo, Zr, Вe имеет существенные затруднения. Различные легирующие элементы, содержащиеся в обрабатываемом материале, оказывают значительное влияние на износ режущих инструментов:

- с увеличением содержания углерода качество обработки улучшается, так как повышается прочность стали, но при этом износ инструмента увеличивается;

- титан, повышая вязкость сталей и сплавов, усиливает склонность их к схватыванию с инструментом (особенно оснащенном двухкарбидными твердыми сплавами), а образующиеся интерметаллидные соединения титана с никелем ухудшают обрабатываемость;

- вольфрам, молибден, хром, ванадий, кобальт, магний образуют комплексные карбиды и входят в твердые растворы, которые увеличивают износ контактных поверхностей инструмента. Сплавы титана с алюминием, молибденом, цирконием и другими элементами, обладая высокой удельной прочностью, хорошей коррозионной устойчивостью и высокой температурой плавления, плохо поддаются обработке резанием. Высокие удельные нагрузки и контактные температуры приводят к интенсивному износу инструментов.

Обрабатываемость резанием тугоплавких металлов и сплавов связана с их кристаллическим строением, химическим составом и теплофизическими свойствами, адгезионными способностями, интенсивной окисляемостью и газонасыщением поверхностных слоев деталей, дороговизной и дефицитностью. По степени улучшения обрабатываемости резанием тугоплавкие материалы можно разделить на такие группы:

- вольфрам и его сплавы;
- молибден, хром и их сплавы;
- тантал, ниобий, ванадий и их сплавы.

Применение бериллия (очень высокая удельная прочность и значительная температура плавления) требует особого внимания при обработке резанием ввиду большой токсичности, образующейся мелкой пылевидной стружки. Это же происходит и при обработке урана.

Повышенная твердость и хрупкость вольфрама, молибдена, хрома заставляют иногда применять резание с искусственным подогревом детали (до 670...770 К), а высокая вязкость и пластичность тантал приводит к тому, что резание его сплавов происходит при низких температурах («криогенное резание» – при охлаждении детали до порога хрупкости металла ~ 90...77 К).

Таблица 1

Материал РИ с различными покрытиями, геометрия и режимы резания, обеспечивающие наилучшую обрабатываемость конструкционных материалов при точении

Наименование материала	Свойства	Вид обработки	Инструментальный материал	Главные углы			Режимы обработки		
				γ°	α°	φ°	V, м/мин	S ₀ , мм/об	t, мм
Хромокремнемарганцевые стали 35ХГСА	НВ 217, E = 180 ГПа, $\sigma_b = 0,8$ ГПа	Получистовая	T15K6 +Al ₂ O ₃ T5K10 +ZrN	12-15	6-8	35	250-320	0,2-0,3	1-2
Хромоникельвольфрамовые стали 30ХНВА	НВ 260, E = 200 ГПа, $\sigma_b = 0,9$ ГПа	Получистовая	T15K6+0,8ZrN+0,2HfN T14K8+0,8ZrN+0,2HfN	10-12	6-8	35	240-300	0,2-0,3	1-2
Коррозионно-жаростойкие стали 12Х18Н10Т	НВ 280, E = 210 ГПа, $\sigma_b = 0,8$ ГПа	Получистовая	BK8 + Al ₂ O ₃ T15K6+0,8ZrN+0,2HfN	5-10	6-8	35	140-180	0,2-0,3	1-2
Жаропрочные деформируемые сплавы ХН77ТЮР	НВ 300, E = 230 ГПа, $\sigma_b = 1$ ГПа	Получистовая	BK6M+TiN+AlN T15K6+ZrN	0-5	8-10	35	60-75	0,18-0,15	1-2
Высокопрочные стали 35Х5МСФА	НВ 310, E = 250 ГПа, $\sigma_b = 2$ ГПа	Получистовая	BK3M+TiN BK6M+TiN+TiC	-5-0	8-10	35	35-50	0,1-0,15	1-2
Жаропрочные литейные сплавы ЖС6К	НВ 300, E = 250 ГПа, $\sigma_b = 1$ ГПа	Получистовая	BK3M+0,8ZrN+0,2HfN BK6M+ZrN	0-5	6-8	35	30-40	0,1-0,15	1-2
Чугуны специальные	НВ 250, E = 160 ГПа, $\sigma_b = 0,55$ ГПа	Получистовая	BK8+0,8ZrN+0,2HfN	0-5	6-8	35	110-120	0,4-0,6	0,4-0,5
			Сандвик коромант+0,8ZrN+0,2HfN	-3-0	6-8	35	90-110	0,4-0,6	0,3-0,4

66

Резание с подогревом вызывает повышение пластичности металла в зоне резания, но возрастает износ инструмента. Низкотемпературная обработка уменьшает адгезию между материалом детали и инструмента, облегчает зарождение и распространение (ветвление и слияние) микротрещин в зоне резания, а следовательно, облегчает процесс стружкообразования.

2. Приборы, материалы и методы их исследований

Исследовался износ режущего инструмента (РИ) – пластины H13A из твердых сплавов BK8, T15K6, MC221 производства СССР, России с покрытием 0,18 HfN + 0,82 ZrN при точении стали ШХ15, закаленной в масле при температуре 800° С (выдержка 150 минут). Структура стали – сорбит отпуска, твердость 59 HRC.

Покрытие 0,18 HfN + 0,82 ZrN наносилось при потенциале на подложке 350 В, давлении азота $P = 3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст, время нанесения покрытия – 30 мин, микротвердость – $H_{\mu} = 36$ ГПа.

Износ измерялся на инструментальном и оптическом микроскопах, где определялись также размеры лунки на передней поверхности.

Точение производилось на модернизированном станке 1К62 при режимах резания: число оборотов $n = 630$ об/мин, глубина резания – 0,25 мм, подача – 0,15 мм/об.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты исследования обрабатываемости, полученные нами и заимствованные из наших обзоров и работ других авторов [2-5], позволило провести настоящий анализ.

Основные факторы, влияющие на выбор оптимальных режимов резания и геометрических параметров инструментов при резании труднообрабатываемых материалов:

- интенсивный износ инструмента и его низкая стойкость;
- налипсы, наплывы, задиры, микро- и макротрещины, возникающие в поверхностном слое детали;
- образование металлических пленок на задних поверхностях режущей части инструментов, изготовленных из синтетических алмазов, эльбора и других сверхтвердых материалов;
- высокая степень наклепа, большие остаточные напряжения;
- структурно-фазовые превращения в тонких поверхностных слоях детали;
- интенсивное газонасыщение в нагретых контактных слоях;
- загрязнение стружки составляющими смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) (стружка дорогостоящих и дефицитных материалов идет во вторичную переработку).

Уровень режимов резания для РИ с покрытием или упрочненным слоем при точении широко применяемых тугоплавких металлов и геометрические параметры резцов приведены в табл. 1 - 4.

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что оценка относительной обрабатываемости высокопрочных и тугоплавких материалов должна производиться с учетом изменения ее под влиянием условий резания, т.е. быть

комплексной, включающей в себя все технологические характеристики.

Аналогичные данные для случая применения РИ с различными покрытиями приведены в табл. 1, 2, а для случая РИ с комбинированным упрочнением – в табл. 3, 4.

При оценке обрабатываемости тугоплавких материалов основную роль играют не механические свойства, а диффузионная и адгезионная активность материала и его работоспособность в различных рабочих средах. Например, при точении ниобиевых и танталовых сплавов допустимые скорости резания гораздо меньше, чем для малоуглеродистых сталей, обладающих примерно такими же механическими характеристиками. Бериллий обрабатывается твердосплавным инструментом (ВК6М и ВК3М) со скоростями резания в 1,5–2 раза меньшими, чем более твердый чугун. Оптимальные скорости резания танталовых и жаропрочных сплавов примерно одинаковые, но прочность таких сплавов, как, например, ЭИ247Б ($\sigma_s = 10$ ГПа), в 2–2,5 раза выше, чем у сплавов на основе тантала.

Вольфрам и его сплавы, а также монокристаллы вольфрама наиболее целесообразно обрабатывать инструментами, оснащенными сверхтвердым материалом (СТМ). Например, стойкость резцов из кубического нитрида бора примерно в 6–8 раз больше, чем стойкость сплава ВК6ОМ. Точение эльборовыми резцами также позволяет получать точность 6–7-го квалитетов, а шероховатость обработанной поверхности $R_a < 2,5$ мкм. Контактные температуры при точении эльборовыми резцами в 3–5 раз меньше, чем при точении твердосплавным инструментом. Стойкость резцов, оснащенных СТМ, можно повысить в 1,5–2 раза, применяя обработку в среде углекислого газа или при глубоком охлаждении (до 77 К) системы “инструмент–деталь”. Тонкое точение вольфрама резцами из эльбора P может с успехом заменить операцию шлифования.

Обработка композиционных материалов, обладающих высокой прочностью, достаточной жесткостью и низким удельным весом, которые широко применяются в авиационной технике (например, использование волокон графита, бора, карбида кремния и стекол для армирования различных матриц на эпоксидной смоле и других материалах), также затруднено. Иногда применяют композиционные материалы, состоящие из вольфрамовых волокон в никель-кобальтовой матрице, значительно превосходящие по потенциальной прочности традиционные однородные материалы.

Обработка резанием композитов требует значительного внимания технологов, так как закономерности деформирования и разрушения этих материалов в наибольшей степени зависят от анизотропии их свойств и направления силового воздействия (вдоль или поперек волокон, по матрице или по границам). Возникшая в композиционном материале (при внедрении в него режущего лезвия) макротрещина будет распространяться с разными скоростями (по волокну и по связке) и, возможно, будет гаситься мягкой матрицей. Технологию, занимающемуся обработкой композиционных материалов, необходимо учитывать, что они способны выдержать в определенном направлении большие растягивающие напряжения, но при этом слабо сопротивляются сдвиговым нагрузкам.

Получение высокой точности и хорошего качества при механообработке композиционных материалов является сложной задачей для технологов.

Таблица 2

Материал, геометрия РИ и режимы резания, обеспечивающие наилучшую обрабатываемость конструкционных материалов при точении

Наименование материала	Свойства	Вид обработки	Инструментальный материал	Главные углы			Режимы обработки		
				γ°	α°	φ°	V, м/мин	S_0 , мм/об	t, мм
Вольфрам W и его сплавы	$T_{пл}=3683$ К, $E=35,2$ ГПа, $\rho=19,2$ г/см ³	Получистовая, чистовая	ВК6М+ZrN ВК10ХОМ+0,8ZrN+HfN	5–10	8–10	45	6–20	0,5–1,0	2–3
			ВК6ОМ+ZrN	10–15	6–8	30–35	60–80	0,08–0,25	0,2–0,5
		“Алмазная”	ВРК10+TiNACПК, НТТНБ	–5–8	8–10	30	30–40	0,02–0,08	0,08–0,1
Молибден Mo и его сплавы	$T_{пл}=2883$ К, $E=32,3$ ГПа, $\rho=9,92$ г/см ³	Получистовая	ВК6+Al ₂ O ₃ ВК8+0,8ZrN+0,НfN	15–20	10–12	45–60	120–150	0,2–0,5	1–3
		Чистовая	ВК6ОМ+Cr ₂ 3C ₆	20	10–12	35–45	150–180	0,1–0,2	0,8–1,0
		“Алмазная”	АСПК ПНТБ	–5–8	8–10	35	40–45 125–160	0,04–0,08 0,05–0,08	0,2–0,25 0,25–0,3
Тантал Ta и его сплавы	$T_{пл}=3273$ К, $E=19$ ГПа, $\rho=16,6$ г/см ³	Получистовая	ВК15ОМ+Cr ₂ 3C ₆ ВК6М+0,8ZrN+HfN	18–20	12–15	45	60–100	0,2–0,4	1–3
		Чистовая	ВК10ОМВК6ОМ	20–25	15	45–60	50–70	0,1–0,15	0,5–0,8
Ниобий Nb и его сплавы	$T_{пл}=2741$ К, $E=10,5$ ГПа, $\rho=8,57$ г/см ³	Получистовая	ВК8+HfN ВК6+ZrN(0,8)+HfN(0,2)	15–20	10–15	35–40	100–130	0,15–0,3	1–3
		Чистовая	ВК10ОМ+Ti(NO) ВК6М+Ti(CN)	18–20	8–12	45–50	120–150	0,08–0,15	0,6–0,8
Бериллий Be	$T_{пл}=1556$ К, $E=30$ ГПа, $\rho=1,85$ г/см ³	Получистовая	ВК6М+TiCN ВК4+Al ₂ O ₃	10–12	8–10	45	100–120	0,2–0,5	1–3
		Чистовая	ВК3М+TiCN ВК6ОМ	12–15	10–12	45	150–180	0,05–0,2	0,5–0,6
Титан Ti и его сплавы	$T_{пл}=1938$ К, $E=11,25$ ГПа, $\rho=4,5$ г/см ³	Получистовая	ВК8+ZrN ВК6+0,8ZrN+0,2HfN	0–5	8–10	35–45	30–50	0,5–1,5	3–7
		Чистовая	ВК6М+Al ₂ O ₃ ВК4+Cr ₂ N ₃	5–15	8–10	35–45	60–110	0,1–0,5	0,5–4

Таблица 3
 Материал РИ с различными покрытиями, геометрия и режимы резания, обеспечивающие наилучшую обрабатываемость
 конструкционных материалов при точении

Наименование материала	Свойства	Вид обработки	Инструментальный материал	Главные углы			Режимы обработки		
				γ°	α°	φ°	V, м/мин	S0, мм/об	t, мм
Хромокремне-марганцевые стали 35ХГСА	HB 217, E = 180 ГПа, $\sigma_B = 0,8$ ГПа	Получистовая	T15K6 + TiCN + C ⁺ + Л _{мод} T5K10 + 0,8ZrN + 0,2HfN + ZrN ⁺ + Hf ⁺ + Л _{мод}	12–15	6–8	35	280–340	0,2–0,3	1–2
Хромоникель-вольфрамовые стали 30ХНВА	HB 260, E = 200 ГПа, $\sigma_B = 0,9$ ГПа	Получистовая	T15K6 + TiCN + C ⁺ + N ⁺ + Л _{мод} T14K8 + TiCN + C + N + Ti + Л _{мод}	10–12	6–8	35	260–320	0,2–0,3	1–2
Коррозионно-жаростойкие стали 12Х18Н10Т	HB 280, E = 210 ГПа, $\sigma_B = 0,8$ ГПа	Получистовая	BK8 + Al ₂ O ₃ + C ⁺ + N ⁺ + Л _{мод} T15K6 + 0,8ZrN + 0,2HfN + ZrN + Hf + Л _{мод}	5–10	6–8	35	150–170	0,2–0,3	1–2
Жаропрочные деформируемые сплавы ХН77ТЮР	HB 300, E = 230 ГПа, $\sigma_B = 1$ ГПа	Получистовая	BK6M + TiCN + Ti ⁺ + Л _{мод} T15K6 + 0,8ZrN + 0,2HfN + ZrN ⁺ + Hf ⁺ + Л _{мод}	0–5	8–10	35	50–60	0,18–0,15	1–2
Высокопрочные стали 35Х5МСФА	HB 310, E = 250 ГПа, $\sigma_B = 2$ ГПа	Получистовая	BK3M + 0,8ZrN + 0,2HfN + ZrN ⁺ + Hf ⁺ + Л _{мод} BK6M + TiCN + C ⁺ + N ⁺ + Ti ⁺ + Л _{мод}	–5–0	8–10	35	40–50	0,18–0,15	1–2
Жаропрочные литейные сплавы ЖС6К	HB 300, E = 250 ГПа, $\sigma_B = 1$ ГПа	Получистовая	BK3M + 0,8ZrN + 0,2HfN + ZrN ⁺ + Hf ⁺ + Л _{мод} BK6M + TiCN + C ⁺ + N ⁺ + Ti ⁺ + Л _{мод}	0–5	6–8	35	25–35	0,1–0,15	1–2
Чугуны специальные	HB 250, E = 160 ГПа, $\sigma_B = 0,55$ ГПа	Получистовая	BK8 + 0,8ZrN + 0,2HfN + ZrN ⁺ + Hf ⁺ + Л _{мод}	–5–0	6–8	35	110–140	0,4–0,6	0,4–0,5
			Сандвик коромант + 0,8ZrN + 0,2HfN + ZrN ⁺ + Hf ⁺ + Л _{мод}	0–5	5–7	35	100–120	0,4–0,6	0,3–0,4

Таблица 4

Материал РИ, геометрия РИ и режимы резания, обеспечивающие наилучшую обрабатываемость
конструкционных материалов при точении

Наименование материала	Свойства	Вид обработки	Инструментальный материал	Главные углы			Режимы обработки		
				γ°	α°	φ°	V, м/мин	S_0 , мм/об	t, мм
Вольфрам W и его сплавы	$T_{пл} = 3683 \text{ К}$, $E = 35,2 \text{ ГПа}_3$ $\rho = 19,2 \text{ г/см}^3$	Получистовая	ВК6М+TiCN+C+N+Ti+Л _{Мод} ВК10ХОМ+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод} ВК6ОМ+Al ₂ O ₃ +Al ⁺ +Л _{Мод}	5–10 10–15	8–10	45	10–30	0,5–1,0	2–3
		Чистовая	ВРК10+TiN+N ⁺ +Ti ⁺ +Л _{Мод}	–5–8	6–8	30–35	80–120	0,08–0,25	0,2–0,5
		“Алмазная”	АСПК НТНБ	0–3	8–10	30	40–50	0,02–0,08	0,08–0,1
Молибден Mo и его сплавы	$T_{пл} = 2883 \text{ К}$, $E = 32,3 \text{ ГПа}_3$ $\rho = 9,92 \text{ г/см}^3$	Получистовая	ВК6+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод} ВК8+TiCN+C+N ⁺ +Ti ⁺ +Л _{Мод}	15–20	10–12	45–60	150–160	0,2–0,5	1–3
		Чистовая	ВК6ОМ+TiCN+C+Ti+Л _{Мод}	20–50	10–12	35–45	180–220	0,1–0,2	0,8–1,0
		“Алмазная”	АСПК ПНТБ	0–5	8–10	35	40–45 125–160	0,04–0,08 0,05–0,08	0,2–0,25 0,25–0,3
Тантал Ta и его сплавы	$T_{пл} = 3273 \text{ К}$, $E = 19 \text{ ГПа}_3$ $\rho = 16,6 \text{ г/см}^3$	Получистовая	ВК15ОМ+TiCN+C+N+Ti+Л _{Мод} ВК6М+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод}	18–20	12–15	45	70–120	0,2–0,4	1–3
		Чистовая	ВК10ОМ+TiCN+C+N+Ti+Л _{Мод} ВК6М+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод}	20–25	15	45–60	120–140	0,1–0,15	0,5–0,8
Ниобий Nb и его сплавы	$T_{пл} = 2741 \text{ К}$, $E = 10,5 \text{ ГПа}_3$ $\rho = 8,57 \text{ г/см}^3$	Получистовая	ВК8+TiCN+C+Ti+Л _{Мод} ВК6+ZrN(0,8)+HfN(0,2)	15–20	10–15	35–40	120–150	0,15–0,3	1–3
		Чистовая	ВК10ОМ+TiCN+C+N+Ti+Л _{Мод} ВК6М+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод}	18–20	8–12	45–50	120–160	0,08–0,15	0,6–0,8
Бериллий Be	$T_{пл} = 1556 \text{ К}$, $E = 30 \text{ ГПа}_3$ $\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$	Получистовая	ВК6М+TiCN+C+Ti+Л _{Мод} ВК4+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод}	10–12	8–10	45	120–145	0,2–0,5	1–3
		Чистовая	ВК3М+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод} ВК6ОМ+Al ₂ O ₃ +Al ⁺ +Л _{Мод}	12–15	10–12	45	80–100	0,05–0,2	0,5–0,6
Титан Ti и его сплавы	$T_{пл} = 1938 \text{ К}$, $E = 11,3 \text{ ГПа}_3$ $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$	Получистовая	ВК8+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод} ВК6+Al ₂ O ₃ +Al ⁺ +Л _{Мод}	0–5	8–10	35–45	40–70	0,5–1,5	3–7
		Чистовая	ВК6М+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод} ВК4+0,8ZrN+0,2HfN+ZrN+Hf+Л _{Мод}	5–15	8–10	35–45	80–120	0,1–0,5	0,5–4

На основании приведенных исследований составлена таблица, где даны значения снимаемого объема материала (закаленная сталь ШХ15 HRC = 59) за период стойкости РИ при черновом точении (критерий – износ по задней поверхности $h_3 = 0,6$ мм), при получистовом точении ($h_3 = 0,4$ мм) и чистовом точении ($h_3 = 0,25$ мм) закаленной стали ШХ15 пластинами ВК8 (производства СССР) (покрытие 0,18 HfN + 0,82 ZrN); Т15К6 (производства СССР) с покрытием 0,18 HfN + 0,82 ZrN, пластинами из MC221 (трехкарбидный ТС) с покрытием 0,18 HfN + 0,82 ZrN и пластинами из Т15К6 с покрытием 0,18 HfN + 0,82 ZrN. В табл. 5 даны стойкость РИ из этих твердых сплавов T_p и производительность обработки Π , приведены рейтинги по G , T_p , Π и даны режимы резания, их реализующие.

Обобщение полученных данных позволяет не только определить рейтинг каждого из режимов по величине снимаемого объема материала за период стойкости, по величине стойкости и производительность.

Представленная таблица 5 позволяет найти суммарный рейтинг в зависимости от вида обработки (черновая, получистовая или чистовая), найти наиболее эффективный режим резания по максимуму величины снимаемого объема материала, а также по стойкости (определяет частоту смены инструмента) и производительности, что определяет время на обработку одной детали и количество деталей, которые могут быть обработаны одной или всеми режущими гранями пластины, а значит, и найти потребное количество пластин для обработки всех деталей партии.

Во все исследованные промежутки времени необходимо определить эффективность обработки, которую оценим по величине снимаемого объема за период стойкости и динамике износа по задней поверхности (примем критерием износа достижение износа по задней поверхности, а для чистовой обработки $h_{3п} = 0,25$ мм, для получистовой $h_{3п} = 0,4$ мм, для черновой - $h_{3п} = 0,6$ мм). Мы сможем определить снимаемый объем за период стойкости по величине прогнозируемой величины стойкости:

$$T_{np} = \frac{h_{3п.кр}}{V_{изн.3п}} = \frac{h_{3п.кр} \times (t_3 - t_2)}{h_{3п3} - h_{3п2}} \quad ((1))$$

Получив период стойкости, можем получить величину прогнозируемого снимаемого объема за период стойкости как

$$G_{np} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times T_{np} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times \frac{h_{3п.кр} \Delta t_{32}}{h_{3п3} - h_{3п2}}, \quad ((2))$$

где $h_{3п кр}$ – допускаемый износ по задней поверхности; $h_{3п 3}$ – износ по задней поверхности к концу третьего периода работы; $h_{3п 2}$ – износ по задней поверхности к концу второго периода работы; t_3 и t_2 – время работы в третьем и во втором периодах; G_3 и G_2 – снимаемый объем материала за время t_3 и t_2 .

4. Критерии оценки эффективности режима обработки.

Очевидно, что объективным критерием режима обработки детали будет снимаемый объем за период стойкости РИ, сравнение режимов резания по этому критерию даст тот режим, при котором РИ эксплуатируется с полной отдачей, причем для черновой обработки критерий стойкости $h_3 = 0,6$ мм, получерновой $h_3 = 0,4$ мм, а для чистовой $h_3 = 0,25$ мм.

Стойкость режущего инструмента при соответствующих режимах резания дает возможность определить количество обработанных деталей (или их поверхностей) за период стойкости n , которое определится как

$$n = \frac{T \cdot S}{L},$$

где L – длина обрабатываемой поверхности.

Очевидно, что при обработке длинных поверхностей необходимо иметь n несколько больше любого целого числа, если же он несколько меньше целого числа то, очевидно, тогда следует выбирать режим с несколько меньшей стойкостью, но с большей производительностью, когда n будет несколько больше целого числа.

Производительность обработки – это отношение снимаемого объема за период стойкости G к величине стойкости РИ – T :

$$\Pi = \frac{G_{max}}{T}.$$

Этот критерий наиболее важен, когда необходимо обеспечить получение детали в кратчайший срок, т.е. когда отсутствие этой детали задерживает выпуск узла.

В табл. 5 даны значения снимаемого объема за период стойкости для черновой ($h_3 = 0,6$ мм), получистовой ($h_3 = 0,4$ мм) и чистовой ($h_3 = 0,25$ мм), режимы обработки, при которых он реализует (скорость резания – V , м/с; глубина резания – t , мм; подача – S , мм/об), стойкость РИ – T с, производительность – Π , мм³/с и рейтинги режимов обработки по этим критериям.

Анализ данных таблицы 5 показывает, что по первому критерию снимаемому объему материала за период стойкости наиболее удачный 10 режим ($V = 1,32$ м/с, $t = 0,25$ мм, $S = 0,15$ мм/об) при стойкости $T = 1092$ с и производительности $320,5$ мм³/с (РИ ВК8 – покрытия Россия), следующий по рейтингу обработки режим 4, режимы резания ($V = 0,81$ м/с, $t = 0,25$ мм, $S = 0,15$ мм/об) при стойкости 1350 с и производительности – 148 мм³/с (РИ – ВК8, покрытие Россия), третий по рейтингу обработки 3 режим ($V = 0,81$ м/с, $t = 0,25$ мм, $S = 0,15$ мм/об) при стойкости 1350 с и производительности $40,7$ мм³/с (РИ ВК8 с покрытием, Россия).

По критерию стойкости первый рейтинг у режимов 4, 5 и 11 для соответствующих существенно отличающихся режимов ($V = 0,81$; $0,81$ и $1,32$ м/с, $t = 0,25$ мм, $S = 0,15$ мм/об) при соответствующих снимаемых объемах: $2,1 \cdot 10^5$; $3,5 \cdot 10^4$; $1 \cdot 10^4$ мм³ величина, которая соизмерима со снимаемым объемом для режимов 4 и 2 (РИ – ВК8 с покрытием), тогда как для 11 режима (ВК8 без покрытия) он очень мал, что подтверждает тезис о далеко не рационально использовать как критерий эффективности работы РИ – стойкость.

1. Вторым по рейтингу и по критерию стойкости будет режим 10 при режимах резания ($V = 1,32$ м/с, $t = 0,25$ мм, $S = 0,15$ мм/об) при снимаемом объеме $G = 3,5 \cdot 10^5$ мм³, производительности $\Pi = 320,5$ мм³/с. В этом случае режимы близки по первому – 1 и второму – 2 критериям. Третьим по этому рейтингу будет режим с режимами резания ($V = 1,6$ м/с, $t = 0,25$ мм, $S = 0,15$ мм/об) при снимаемом объеме за период стойкости $\Pi = 31,4$ мм³/с (РИ – ВК8 с покрытием) видно, что по остальным критериям этот режим не самый удачный, что подтверждает тезис о неприемлемости критерия стойкости РИ в качестве [Text]: monograph-reference book / G.I. Kostyuk. – Kh.:National aerospace university named

Снимаемый объем материала за период стойкости G (при $h_{3П} = 0,6; 0,4$ и $0,25$ мм), максимальная стоимость T_p ; производительность обработки – П и режимы резания, при которых они реализуются, а также рейтинг режимов резания по этим критериям и суммарный рейтинг (точение стали ШХ15)

Таблица 5

№ п/п	Материал РИ, покрытие	G, мм ³			Режимы резания			T _p , с	П, мм ³ /с	Рейтинг по			Суммарный рейтинг
		$h_3 = 0,6$, мм	$h_3 = 0,4$, мм	$h_3 = 0,25$, мм	V, м/с	t, мм	S, мм/об			G	T _p	П	
ШХ15													
1	T15K6 с покрытием	$1,4 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^3$	1,38	0,25	0,15	300	37,04	21	18	13	23
2	BK8 (СССР) с покрытием	$1,2 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	1,32	0,25	0,15	600	20	23	11	15	22
3		$1,8 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$0,82 \cdot 10^4$	0,815	0,25	0,15	450	40	19	15	12	20
4	BK8 (Россия) с покрытием	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	0,81	0,25	0,15	1350	148	2	2	8	2
5		$5,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^3$	0,81	0,25	0,15	1350	40,7	7	2	12	5
6	BK8 с покрытием	$2,7 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^3$	1,6	0,25	0,15	860	31,4	14	6	13	10
7	BK8 с покрытием	$2,7 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^3$	1,65	0,25	0,15	660	40,9	14	9	12	12
8	BK8 (Россия) с покрытием	$2,25 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	10^4	2,02	0,25	0,15	340	66,2	17	17	11	19
9		$7 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	0,25	0,15	115	60,9	26	24	11	27
10	BK8 с покрытием	$3,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	1,32	0,25	0,15	1092	320,5	1	3	2	1
11	BK8 без покрытия	$1 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	1,32	0,25	0,15	1350	7,4	25	2	17	18
12	ВОК60	$2,65 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	1,35	0,25	0,15	175	151,4	15	21	7	17
13	MC221 с покрытием	$5,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^3$	1,6	0,25	0,15	860	64	7	6	11	7
14		$2,8 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$8,7 \cdot 10^3$	1,3	0,25	0,15	520	54	13	14	12	14
15	MC22	$2,4 \cdot 10^4$	$1,45 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^3$	1,33	0,25	0,15	810	29,6	16	8	14	13
16		$5,7 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^4$	10^4	4,32	0,25	0,15	1760	32,38	6	1	13	4
17		10^5	$4,7 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	1,34	0,25	0,15	840	119,05	4	7	9	4
18	Сандвик Коромант	$3,5 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$	1,3	0,25	0,15	810	43,2	2	8	12	6
19		$3,2 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	1,32	0,25	0,15	540	59,26	10	13	12	12
20		$2 \cdot 10^4$	1,6	$1,0 \cdot 10^4$	1,63	0,25	0,15	420	47,6	18	16	12	20

Продолжение 1 таблицы 5

№ п/п	Материал РИ, покрытие	G, мм ³			Режимы резания			Тр, с	П, мм ³ /с	Рейтинг по			Суммарный рейтинг
		h ₃ = 0,6, мм	h ₃ = 0,4, мм	h ₃ = 0,25, мм	V, м/с	t, мм	S, мм/об			G	Тр	П	
21	СК комбинированная обработка			6,5·10 ⁴	1,269	0,25	0,6	50	1300	5	26	1	9
22				1,3·10 ⁴	1,31	0,25	0,6	55	236,36	22	25	3	21
23					1,8·10 ⁴	1,59	0,25	0,3	150	120	19	22	9
24	СК комбинированная обработка			1,4·10 ⁴	1,25	0,25	0,3	150	93,33	21	22	10	24
25	СК покрытия			1,4·10 ³	1,23	0,25	0,35	88	15,91	21	24	15	26
26	СК покрытия	1,05·10 ⁴	9,5·10 ³	9·10 ³	1,23	0,5	0,35	88	119,32	24	24	9	25
27	СК покрытия		2,5·10 ⁴	7,5·10 ³	1,57	0,25	0,65	165	151,52	16	20	7	17
28	СК покрытия			4·10 ⁴	1,25	0,25	0,3	260	153,85	8	19	7	12
29	СК покрытия	1,8·10 ⁵	1,6·10 ⁵	1,2·10 ⁴	1,24	0,25	0,6	980	183,67	3	4	6	3
30	СК покрытия	1,5·10 ⁴	1,2·10 ⁴	4·10 ³	1,28	0,25	0,15	550	27,27	20	12	14	20
31	СК покрытия	1,2·10 ⁴ (2,5·10 ⁴)	9·10 ³	5,5·10 ³	1,22	0,25	0,15	650	18,46	16	10	16	16
32	СК покрытия	3,9·10 ⁴	1,3·10 ⁴	10 ⁴	1,25	0,265	0,21	420	92,86	9	16	10	12
33	СК покрытия	3,0·10 ⁴	2,2·10 ⁴	1,7·10 ⁴	0,807	0,25	0,15	900	33,33	12	5	13	8
34	СК покрытия	2,7·10 ⁴	2·10 ⁴	1,7·10 ⁴	0,802	0,25	0,15	138	195,7	14	23	4	15
Сандвик Коромант	комбинированное упрочнение с покрытием 0,18HfN + 0,82ZrN	4·10 ⁴	1,2·10 ⁴	7·10 ³	0,9	0,5	0,15	376	104,6	8	11	3	7
		1,8·10 ⁴	10 ³	3,8·10 ³	0,89	0,25	0,15	768	23,4	13	7	14	15
Сандвик Коромант + КУ	комбинированное упрочнение с покрытием 0,18HfN + 0,82ZrN	1,8·10 ⁴			0,89	0,35	0,15	256	46,1	14	13	9	16
Сандвик Коромант+ покрытие	0,18HfN + 0,82ZrN	2,2·10 ⁴	7,2·10 ³	5·10 ³	0,8	0,35	0,15	390	56,4	11	12	8	14
		1,7·10 ⁴	7·10 ³	4,2·10 ³	2,57	0,35	0,15	252	67,5	13	13	5	14
		2,2·10 ⁴	1,42·10 ⁴	8,2·10 ³	3,38	0,35	0,15	134	164,2	11	14	1	9
		2,2·10 ⁴	8,85·10 ³	8,1·10 ³	0,83	0,35	0,12	584	37,7	11	7	11	12
		1,0325·10 ⁴	1,025·10 ⁴	1,05·10 ⁴	0,83	0,35	0,12	482	21,8	16	10	14	18

Сталь 45

Материал РИ	Покрытие, упрочнение	G, мм ³ при h ₃ = 0,6	G, мм ³ при h ₃ = 0,4	G, мм ³ при h ₃ = 0,25	Режимы резания			Тр, с	П ₁ , мм ³ /с	Рейтинг по			Суммарный рейтинг
					V, м/с	t, мм	S, мм/об			G	Тр	П	
Сандвик Коромант	0,18HfN + 0,82ZrN	4,47·10 ⁴ скол	-	-	0,79	0,5	0,15	750	59,6	6	8	7	6
		1,28·10 ⁵	7,7·10 ⁴	2,4·10 ⁴	0,85	0,25	0,15	450	28,4	4	11	13	11
		2,5·10 ⁵	1,88·10 ⁴	1,25·10 ⁴	1,35	0,25	0,15	4000	62,5	1	1	6	1
		5·10 ⁴ Скол			0,77	0,35	0,15	1250	40	6	4	10	5
		2,4·10 ⁴	1,88·10 ⁴	1,25·10 ⁴	1,38	0,25	0,15	492	48,8	10	8	9	10
		2,11·10 ⁴	1,4·10 ⁴	8·10 ³	0,832	0,35	0,12	484	43,6	12	9	10	14
		3,1·10 ⁴	1,3·10 ⁴	0,8·10 ⁴	0,81	0,35	0,13	968	32,2	9	6	12	10
Сандвик Коромант	0,18HfN + 0,82ZrN			4,4·10 ⁴ излом	0,795	0,5	0,15	750	57	7	8	8	8
				5,2·10 ⁴ скол h=0,1 мкм	0,74	0,35	0,15	1250	41,7	6	4	10	5
Сандвик Коромант	0,18HfN + 0,82ZrN	1,28·10 ⁵	7,5·10 ⁴	2,48·10 ⁴	0,847	0,25	0,15	4000	32	4	1	12	4
		2,4·10 ⁴	6,45·10 ³	1,24·10 ³	1,380	0,25	0,15	492	48	10	10	9	12
Сандвик Коромант	0,18HfN + 0,82ZrN	3,1·10 ⁴	1,3·10 ⁴	0,7·10 ⁴	0,815	0,35		1320	23,5	9	3	14	9
MC221	0,18HfN + 0,82ZrN	>1,3·10 ⁵	2·10 ⁴	10 ⁴	0,85	0,35	0,15	2590	50,2	3	2	9	2
		>8·10 ⁵	1,2·10 ⁴	7·10 ³	0,87	0,35	0,15	777	103	5	7	3	3
		4,1·10 ⁴	4,4·10 ⁴	2,3·10 ⁴	0,835	0,35	0,35	1036	39,6	7	5	10	7
MC221	0,18HfN + 0,82ZrN	>1,3·10 ⁵	2·10 ⁴	10 ⁴	0,85	0,35	0,15	2590	50,2	3	2	9	2
		>8·10 ⁵	1,2·10 ⁴	7·10 ³	0,87	0,35	0,15	777	103	5	7	3	3
		4,1·10 ⁴	4,4·10 ⁴	2,3·10 ⁴	0,835	0,35	0,35	1036	39,6	7	5	10	7
MC221	0,18HfN + 0,82ZrN	2,1·10 ⁵	4,3·10 ⁴	2,05·10 ⁴	0,8	0,35	0,3	2590	81,1	2	2	4	1
T15K6	0,18HfN + 0,82ZrN	1,7·10 ⁴ скол	-	-	0,878	0,5	0,3	130	130,8	13	15	2	13
		1,1·10 ⁴ скол	-	-	0,876	0,35	0,5	720	15,3	15	9	15	17

after N. E. Guko критерия эффективности работы РИ – стойкость, очевидно он является дополнительным при проектировании технологических процессов обработки.

При обработке закаленной стали 45 максимальный суммарный рейтинг (1) реализуется для РИ из твердого сплава MC221 с покрытием (режим 21), хотя по снимаемому объему материала за период стойкости он имеет лишь 2 рейтинг и по стойкости T_p имеет тоже 2 рейтинг. Второй суммарный рейтинг имеет также РИ у MC221 (режим 22) с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN по G имеет 3, а по T_p - 2 рейтинг.

Суммарный первый рейтинг имеет также РИ Сандвик Коромант с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN (режим 1) по T_p - 1 рейтинг, по производительности L - 6 рейтинг.

Выводы

1. Получены режимы резания и геометрия режущих инструментов с покрытием при обработке труднообрабатываемых и тугоплавких материалов, обеспечивающие наилучшую их обрабатываемость.

2. Найден режим резания для обработки закаленных сталей ШХ15 и стали 45 по максимальном суммарному критерию по максимальному снимаемому объему материала за период стойкости, по стойкости и производительности, что позволяют выбирать режимы обработки по любому критерию.

Список литературы

2. Костюк Г.И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах / Г.И. Костюк. - К.: изд-во Международной академии наук и инновационных технологий, 2012.-728 с.

3. имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Книга 1. Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. - К.: изд-во АИНУ, 2002. - 596 с.

4. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Книга 2. Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования [Текст] / Г.И. Костюк. - К.: изд-во АИНУ, 2002. - 482 с.

5. Костюк Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник [Текст] / Г.И. Костюк. - К.: «Антиква», 2003. - 412 с.

6. Костюк Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.:Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.

7. Kostyuk G.I. The effective cutting tools having the coating and hardened layers vsky «КНАІ», 2007. – 633 p.

8. Костюк Г.И. Исследование эффективности механической обработки стали 16ХЗМВФНБ-Ш РИ с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN [Текст] / Г.И. Костюк, А.В. Фадеев, А.Н.Костюк // Машинобудування та прогресивні технології: сб. науч. тр. АИНУ. – Вып. 3. - Х., 2011. – С. 67-70.

9. Костюк Г.И. Эффективность токарной обработки закаленной стали 40Х РИ с покрытием [Текст] / Г.И. Костюк, К.П. Исяк, И.С.Татаркина, А.А.Бреус // Вестник ХПИ: сб. науч. тр. нац. техн. ун-та «ХПИ». – Вып. 3. - Х., 2011. – С. 9-12.

10. Костюк Г.И. Исследование износа пластин с покрытием при эффективном точении закаленной стали 65Г [Текст] / Г.И. Костюк, И.В. Дощечкина, А.Н. Костюк, Р.В. Воропай // Вестник ХПИ: сб. науч. тр. нац. техн. ун-та «ХПИ». – Вып. 3. - Х., 2011. – С. 50-54.

11. Костюк Г.И. Повышение работоспособности покрытий на РИ при обработке сталей с учетом адгезионного взаимодействия [Текст] / Г.И. Костюк, В.А. Фадеев, О.О. Бруйка // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(63). - Х., 2010. – С. 63-72.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 19.09.2013

Ефективна обробка загартованих сталей, високоміцних і тугоплавких матеріалів ріжучий інструмент з покриттями і зміцненими шарами

Отримано режими ефективної обробки високоміцних і тугоплавких матеріалів і загартованих сталей за такими критеріями: оброблюваності, максимальному снимаемому обсягом матеріалу за період стійкості, стійкості, продуктивності обробки і сумарному рейтингу, що враховує всі три останніх критерію.

Ключові слова: високоміцні, тугоплавкі, конструкційні матеріали, зміцнені шари, критерії, що знімається обсяг матеріалу за період стійкості, стійкість РІ, продуктивність обробки, сумарний рейтинг.

Effective treatment of hardened steels, high strength and heat-resistant materials cutting tool coatings and hardened layers

Received effective treatment regimes and high-strength heat-resistant materials and hardened steels for the following criteria: workability, the maximum volume of the material was filmed over a period resistance, durability, performance, handling and overall rating that takes into account all of the last three criteria.

Keywords: high, refractory, construction materials, reinforced with layers, the criteria to be discontinued for the period the volume of material durability, resistance CT, processing performance, the overall rating.