

УДК 621.91

Г.И. КОСТЮК, О.М. МЕЛКОЗЕРОВА, Р.В. ВОРОПАЙ, А.А. БРЕУС

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 45 РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ С ПОКРЫТИЕМ

*Приведены зависимости снимаемого объема материала за время работы от износа по передней и задней поверхности и размера лунки режущего инструмента (РИ). На примере обработки закаленной стали 45 показано, что одного критерия эффективности обработки закаленных сталей РИ с покрытием недостаточно, а необходимо использовать многокритериальную оценку – суммарный рейтинг, учитывающий величину снимаемого объема материала за период стойкости, стойкость РИ и производительность обработки. Показано, как можно выбрать режимы обработки и материал РИ с покрытием обеспечивающий высокий суммарный рейтинг, с учетом адгезии.*

**Ключевые слова:** закаленная сталь, снимаемый объем материала за период стойкости, стойкость режущего инструмента, производительность обработки, суммарный рейтинг, материал РИ, покрытия, адгезия.

### Введение

Наплавка твердых сплавов на детали, закалка, цементация и другие виды упрочнений приводят к существенному изменению геометрии детали в результате ее коробления из-за чего она требует последующей обработки, чаще всего шлифования, но многие дефекты не могут быть устранены шлифованием. И тогда на первый план выступает точение, которое обеспечивает достаточную точность и требуемую шероховатость [1 – 7]. В то же время наплавка твердых сплавов и детонационное напыление не позволяют использовать детали без последующей формообразующей обработки, т.е. требуют использования точения, строгания, фрезерования или другой механической обработки. Все это говорит об актуальности и важности проводимых исследований.

### 1. Приборы, материалы и методы измерения

Исследовался износ режущего инструмента (РИ) – пластины H13A производства фирмы «Сандвик Коромант» с покрытием 0,18 HfN + 0,82 ZrN при точении стали 45, закаленной в масле при температуре 800°С (выдержка 20 минут) и высокий отпуск при температуре 600°С (выдержка 50 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 – 0,5 мм, подача – 0,15 – 0,3 мм/об.

### 2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследовалась динамика износа по передней и задней поверхностям, а также размеры лунки.

Для выявления эффективности обработки были построены зависимости снимаемого объема материала за время работы от износа по передней и задней поверхности и размера лунки РИ, которая показана на рис. 1 – 4.

Снимаемый объем обработки линейно растет от износа по передней и задней поверхности, а размер лунки остается постоянным при обработке закаленной стали 40X РИ: пластины Сандвик Коромант с комбинированным упрочнением передней поверхности и покрытие 0,18HfN+0,82ZrN, на задней поверхности.

Так как эффективность токарной обработки определяется в основном снимаемым объемом материала за период стойкости [1 – 10] и, приняв критический износ РИ для черногого точения 0,6 мм, для получистового точения 0,4 мм, а для чистового 0,25 мм, то можно определить величину снимаемого объема за период достижения критической шероховатости (технологический критерий).

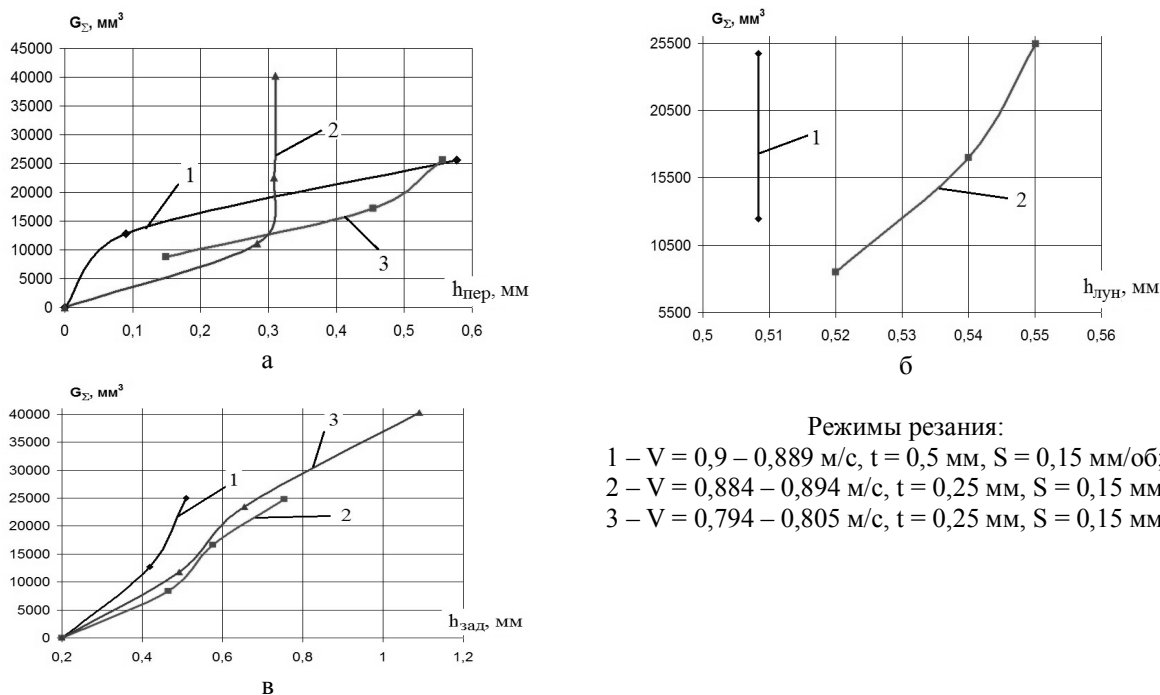


Рис. 1. Изменение снимаемого объема материала за время работы РИ (СК) с покрытием  $0,18 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN} + \text{Al}_2\text{O}_3$  и комбинированным упрочнением от износа по передней (а), задней (в) и размера лунки (б) при обработке закаленной стали 45 HRC = 49

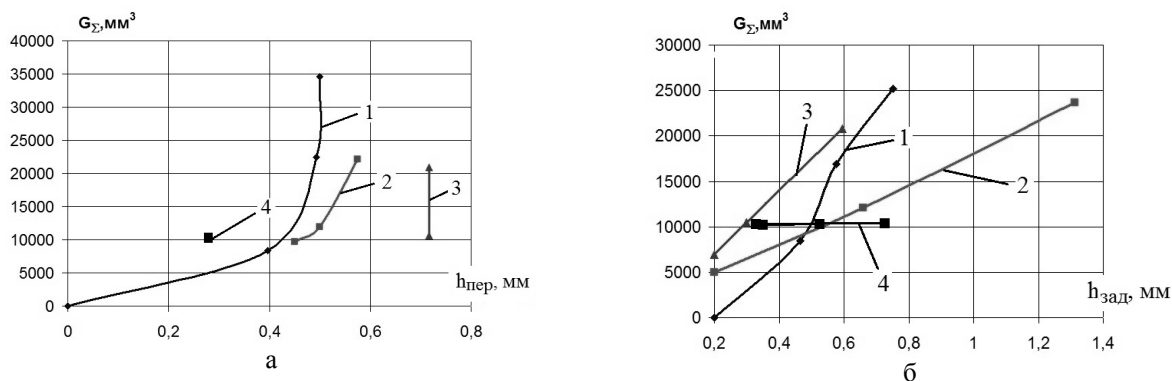


Рис. 2. Изменение снимаемого объема материала за время работы РИ (Сандвик Коромант – H13, с покрытием  $0,18 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ ) от износа по передней (а) и задней (б) поверхности при точении закаленной стали 45 (режимы резания: 1 –  $V = 2,54 - 2,58$  м/с,  $t = 0,35$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 2 –  $V = 3,38 - 3,44$  м/с,  $t = 0,35$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 3 –  $V = 836,8 - 822,4$  мм/с,  $t = 0,35$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 4 –  $V = 821 - 805$  мм/с,  $S = 0,12$  мм/об)

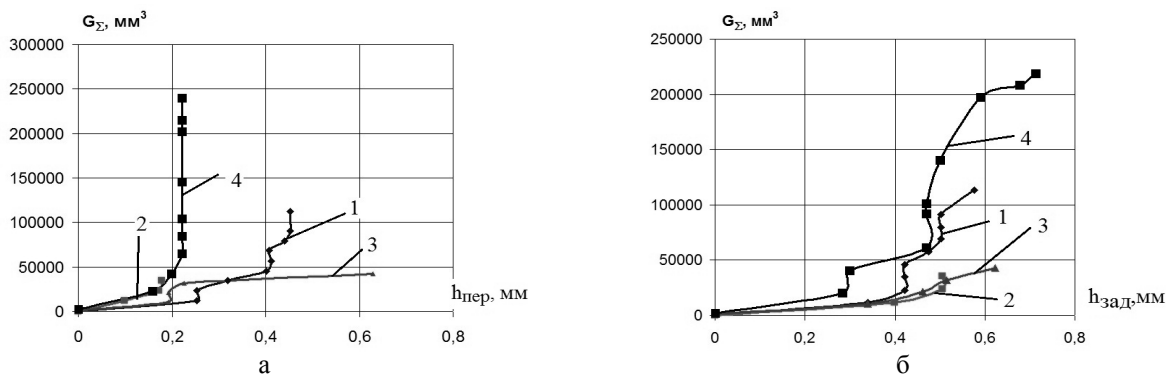


Рис. 3. Изменение снимаемого объема материала за время работы РИ (MC221, с покрытием TiN) от износа по передней (а) и задней (б) поверхности при точении закаленной стали 45 (режимы резания: 1 –  $V = 8,608 - 8,158$  м/с,  $t = 0,35$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 2 –  $V = 8,734 - 8,63$  м/с,  $t = 0,35$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 3 –  $V = 8,106 - 8,002$  м/с,  $t = 0,35$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 4 –  $V = 8,002 - 8,786$  м/с,  $t = 0,35$  мм,  $S = 0,35$  мм/об)

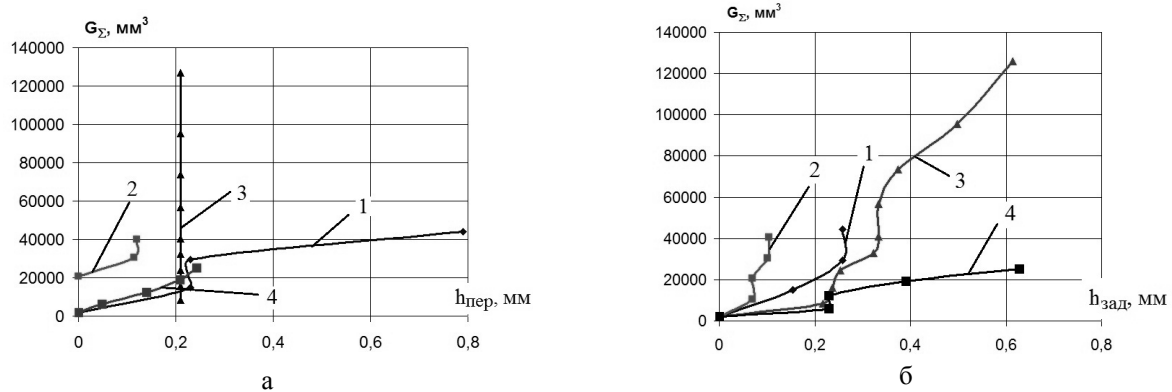


Рис. 4. Изменение снимаемого объема материала за время работы РИ (Sandvik Corporation 3210, с покрытием  $0,18\text{HfN}+0,82\text{ZrN}$ ) от износа по передней (а) и задней (б) поверхности при точении закаленной стали 45 (режимы резания: 1 –  $V=0,805-0,784$  м/с,  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 2 –  $V=0,7803-0,894$  м/с,  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 3 –  $V=0,88891-0,8211$  м/с,  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,15$  мм/об; 4 –  $V=0,88891-0,8211$  м/с,  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,15$  мм/об)

Аналогичные исследования проведены также для комбинированного РИ при другом режиме обработки, глубина уменьшилась до  $0,25$  мм, а подача и скорость резания остались почти такими же. Для этого случая есть возможность определения величины снимаемого объема по критерию износ по задней поверхности  $0,6$  мм – черновая обработка  $0,4$  мм – получистовая,  $0,25$  мм – чистовая обработка. К сожалению, результаты относительно не высокие по величине снимаемого объема за период стойкости. Были проведены исследования для этого же упрочнения с глубиной резания  $0,35$  мм, со скоростью резания  $2,56$  м/с и той же подачей. Оказалось, что существенное увеличение скорости резания больше чем  $2,7$  раза практически не снижает снимаемый объем за период стойкости. Что говорит о том, что комбинированное упрочнение эффективно при высоких скоростях резания (рис. 2 а, б кривая 1). Для РИ – пластина Сандвик Коромант (Н13) с покрытием  $0,18\text{HfN}+0,82\text{ZrN}$  при точении с закаленной сталью 45 при еще более высоких скоростях резания ( $3,7$  м/с и тех же остальных условиях) показывает более высокий снимаемый объем. При более низких скоростях резания (рис. 2 а, б, кривая 4)  $0,822$  м/с, но при более низкой подаче  $0,12$  мм/с снимаемый объем несколько упал. Все это говорит о не очень эффективной работе покрытия Сандвик Коромант. Применение режущего инструмента MC 221 с тем же покрытием приводит к существенной стабилизации результатов и повышением снимаемого объема за период стойкости. За исключением тех случаев, когда происходит термоупругий скол лезвия (рис. 3 а, б кривая 1). В этом случае есть возможность получения снимаемого объема за период стойкости более  $1-2,4 \cdot 10^5$  мм<sup>3</sup> (рис. 3), хотя при реализации скола его значения составляют не более  $4,4 \cdot 10^4$  мм<sup>3</sup> (рис. 4 а, б, кривая 1). Дополнительные исследования рабо-

тоспособности с пластины Сандвик Коромант 3210 показали относительно невысокие результаты из-за скола пластины (рис. 4 а, б кривая 2). Тогда как в других экспериментах практически при тех же режимах реализуется снимаемый объем материала за период стойкости достигает  $1,28 \cdot 10^5$  мм<sup>3</sup>, хотя при тех же режимах и том же РИ реализуется снимаемый объем даже меньше  $3 \cdot 10^4$  мм<sup>3</sup>. Все это говорит, о не стабильном распределении упрочненных участков в материале детали, закаленной (закаленной HRC = 49).

На основании приведенных исследований составлена табл. 1, где даны значения снимаемого объема материала (закаленная сталь 45 HRC = 49) за период стойкости РИ при черновом точении (критерий – износ по задней поверхности  $h_{зп} = 0,6$  мм), при получистовом точении ( $h_{зп} = 0,4$  мм) и чистовом точении ( $h_{зп} = 0,25$  мм) закаленной стали 45 (HRC = 49) пластинами Н13 Сандвик Коромант с комбинированным упрочнением (покрытие  $0,18 \text{HfN} + 0,82 \text{ZrN}$  + лазерная модификация передней поверхности) и только с покрытием  $0,18 \text{HfN} + 0,82 \text{ZrN}$ , пластинами из MC221 (трикарбидный ПС) с покрытием  $0,18 \text{HfN} + 0,82 \text{ZrN}$  и пластинами из T15K6 с покрытием  $0,18 \text{HfN} + 0,82 \text{ZrN}$ . В таблице даны стойкость РИ из этих твердых сплавов Тр и производительность обработки П, представлены рейтинги  $R_i$  по G, по Т<sub>p</sub> и П и даны режимы резания их реализующие.

Представленная табл. 1 в зависимости от вида обработки (черновая, получистовая или чистовая обработка) позволяет найти наиболее эффективный режим резания по максимуму величины снимаемого объема материала, а также определить стойкость (определяет частоту смены инструмента) и производительность, что определяет время на обработку одной детали и число деталей, которые могут быть

обработаны одной или всеми режущими гранями пластины, а значит и определить потребное число 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  $h_{зп} = 0,4$  мм). Мы сможем определить снимаемый объем за период стойкости по величине прогнозируемой величины стойкости:

$$T_{пр} = \frac{h_{зп.кр}}{V_{изн.зп}} = \frac{h_{зп.кр} \times (t_3 - t_2)}{h_{зп3} - h_{зп2}}. \quad (1)$$

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

$$G_{пр} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times T_{пр} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times \frac{h_{зп.кр} (t_3 - t_2)}{h_{зп3} - h_{зп2}}, \quad (2)$$

где  $h_{зп.кр}$  – допускаемый износ по задней поверхности;

$V_{изн.зп}$  – скорость износа по задней поверхности РИ.

$h_{зп3}$  – износ по задней поверхности к концу третьего периода работы; а

$h_{зп2}$  – 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  $t_2$ .

Такой подход позволяет прогнозировать снимаемый объем за период стойкости без проведения полномасштабного эксперимента.

Первый критерий – снимаемый объем материала за период стойкости дает возможность получить максимально возможный результат по снимаемому с детали материалу, но который не учитывает, как быстро достигается этот результат и какое время может работать РИ, которые часто являются важными.

Тогда, на наш взгляд, эффективным критерием должен быть суммарный критерий, который учитывает все три, которые умножены на соответствующий весовой коэффициент  $\mu_i$  (от 0,1 до 1), который определяет важность конкретного критерия для данной задачи обработки. Тогда величина  $Q$  определяется рейтинг по РИ, покрытия и режиму обработки находится так:

$$Q = R_1 \cdot \mu_1 + R_2 \cdot \mu_2 + R_3 \cdot \mu_3.$$

Минимальное значение  $Q$  дает первый суммарный рейтинг с ростом  $Q$  значение рейтинга увеличивается.

Так, приняв  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ , т.е. равнозначность критериев в таблице даны рейтинги режимов, которые учитывают все критерии. Видно, что первый многокритериальный рейтинг получил режим 10, имеющий рейтинг 1, 1, 6 по соответствующим однокритериальным критериям в порядке рассмотрения (РИ – Сандвик Коромант с покрытием  $V = 1,39$  м/с и МС221 ( $V = 10,8$  м/с)). Рейтинги: 2, 2, 9. Второй суммарный рейтинг имеет режим 21 с рейтингами 3, 2, 9 (РИ – МС221 с покрытием,  $V = 8,5$  м/с), третий многокритериальный рейтинг имеет режим 22 с соответствующими однокритериальными рейтингами 5, 7, 3 (РИ – МС221 с покрытием,  $V = 8,7$  м/с).

Для решения вопроса выбора покрытий на РИ эффективных режимов обработки и снижения адгезионного взаимодействия покрытия с обрабатываемым материалом [11 – 14] были проведены расчеты энергии адгезии  $W_p$  и напряжений сцепления  $\sigma$  для различных покрытий, работающих при обработке стали ШХ15, 65Г, 40Х и стали 45 закаленных, что позволило выбирать покрытия с минимальным адгезионным взаимодействием (табл. 2), но в тоже время обладающими высокой стойкостью к абразивному износу.

Для стали ШХ15 минимальную адгезию имеет Si, который не может быть использован в покрытия, тогда как 0,2HfN+0,8ZrN имеет довольно низкое адгезионное сцепление и имеет высокую твердость 36 ГПа, что выводит его на первый план при обработке стали ШХ15. Для стали 40Х по минимуму адгезии также имеет Si, тогда как с учетом величины микротвердости покрытия, покрытия 0,75TiN+0,25AlN и 0,2HfN+0,8ZrN имеют приоритеты по снижению как абразивного так и адгезионного износа. Для закаленных сталей 65Г и стали 45 те же покрытия 0,75TiN+0,25AlN и 0,2HfN+0,8ZrN обладают наиболее выгодными свойствами по износостойкости.

## Выводы

1. В работе получен новый многокритериальный рейтинг, базирующийся на рейтингах по трем критериям:

- максимальный снимаемый объем материала детали за период стойкости РИ при соответствующих режимах резания и материалах РИ и покрытий;
- максимальная стойкость РИ при соответствующих режимах резания, материалах РИ и покрытий;
- максимальная производительность обработки (режимы резания, материалы РИ и покрытия).

2. Показана возможность прогноза снимаемого объема за период стойкости и стойкости пластины с покрытием при заданных режимах резания без полномасштабного эксперимента.

Таблица 1

Снимаемый объем материала за период стойкости G, стойкость T и производительность П  
и режимы резания ее реализующие при точении закаленной стали 45 (HRC=49) (покрытие РИ - 0,18HfN + 0,82ZrN)

Материал РИ	G, мм <sup>3</sup> при h <sub>3</sub> = 0,6	G, мм <sup>3</sup> при h <sub>3</sub> = 0,4	G, мм <sup>3</sup> при h <sub>3</sub> = 0,25	Режимы резания			T <sub>p</sub> , с	П, мм <sup>3</sup> /с	Рейтинг по			Суммарный рейтинг	№ режима
				V, м/с	t, мм	S, мм/об			G	Тр	П		
Сандвик Коротант	4·10 <sup>4</sup>	1,2·10 <sup>4</sup>	7·10 <sup>3</sup>	0,9	0,5	0,15	376	104,6	8	11	3	7	1
	1,8·10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	3,8·10 <sup>3</sup>	0,89	0,25	0,15	768	23,4	13	7	14	15	2
Сандвик Коротант + КУ	1,8·10 <sup>4</sup>	-	-	0,89	0,35	0,15	256	46,1	14	13	9	16	3
Сандвик Коротант + КУ	2,2·10 <sup>4</sup>	7,2·10 <sup>3</sup>	5·10 <sup>3</sup>	0,8	0,35	0,15	390	56,4	11	12	8	14	4
	1,7·10 <sup>4</sup>	7·10 <sup>3</sup>	4,2·10 <sup>3</sup>	2,57	0,35	0,15	252	67,5	13	13	5	14	5
	2,2·10 <sup>4</sup>	1,42·10 <sup>4</sup>	8,2·10 <sup>3</sup>	3,38	0,35	0,15	134	164,2	11	14	1	9	6
	2,2·10 <sup>4</sup>	8,85·10 <sup>3</sup>	8,1·10 <sup>3</sup>	0,83	0,35	0,12	584	37,7	11	7	11	12	7
	1,0325·10 <sup>4</sup>	1,025·10 <sup>4</sup>	1,05·10 <sup>4</sup>	0,83	0,35	0,12	482	21,8	16	10	14	18	8
Сандвик Коротант	4,47·10 <sup>4</sup> скол	-	-	0,79	0,5	0,15	750	59,6	6	8	7	6	9
	1,28·10 <sup>5</sup>	7,7·10 <sup>4</sup>	2,4·10 <sup>4</sup>	0,85	0,25	0,15	450	28,4	4	11	13	11	10
	2,5·10 <sup>5</sup>	1,88·10 <sup>4</sup>	1,25·10 <sup>4</sup>	1,35	0,25	0,15	4000	62,5	1	1	6	1	11
	5·10 <sup>4</sup> скол	-	-	0,77	0,35	0,15	1250	40	6	4	10	5	12
	2,4·10 <sup>4</sup>	1,88·10 <sup>4</sup>	1,25·10 <sup>4</sup>	1,38	0,25	0,15	492	48,8	10	8	9	10	13
	2,11·10 <sup>4</sup>	1,4·10 <sup>4</sup>	8·10 <sup>3</sup>	0,832	0,35	0,12	484	43,6	12	9	10	14	14
	3,1·10 <sup>4</sup>	1,3·10 <sup>4</sup>	0,8·10 <sup>4</sup>	0,81	0,35	0,13	968	32,2	9	6	12	10	15
Сандвик Коротант	-	-	4,4·10 <sup>4</sup> излом	0,795	0,5	0,15	750	57	7	8	8	8	16
	-	-	5,2·10 <sup>4</sup> скол h=0,1 мкм	0,74	0,35	0,15	1250	41,7	6	4	10	5	17
Сандвик Коротант	1,28·10 <sup>5</sup>	7,5·10 <sup>4</sup>	2,48·10 <sup>4</sup>	0,847	0,25	0,15	4000	32	4	1	12	4	18
	2,4·10 <sup>4</sup>	6,45·10 <sup>3</sup>	1,24·10 <sup>3</sup>	1,380	0,25	0,15	492	48	10	10	9	12	19
Сандвик Коротант	3,1·10 <sup>4</sup>	1,3·10 <sup>4</sup>	0,7·10 <sup>4</sup>	0,815	0,35		1320	23,5	9	3	14	9	20
MC221	>1,3·10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	0,85	0,35	0,15	2590	50,2	3	2	9	2	21
	>8·10 <sup>5</sup>	1,2·10 <sup>4</sup>	7·10 <sup>3</sup>	8,7	0,35	0,15	777	103	5	7	3	3	22
	4,1·10 <sup>4</sup>	4,4·10 <sup>4</sup>	2,3·10 <sup>4</sup>	8,35	0,35	0,35	1036	39,6	7	5	10	7	23
MC221	2,1·10 <sup>5</sup>	4,3·10 <sup>4</sup>	2,05·10 <sup>4</sup>	0,8	0,35	0,3	2590	81,1	2	2	4	1	24
T15K6	1,7·10 <sup>4</sup> скол	-	-	0,878	0,5	0,3	130	130,8	13	15	2	3	25
	1,1·10 <sup>4</sup> скол	-	-	0,876	0,35	0,5	720	15,3	15	9	15	17	26

Таблица 2

Энергия адгезионного взаимодействия  $W_p$ , напряжения схватывания  $\sigma$  закаленных сталей ШХ15, 40, 65Г и стали45

Сталь	$W_p, \text{Дж/м}^2$ $\sigma, \text{МПа}$		$W_p, \text{Дж/м}^2$ $\sigma, \text{МПа}$		$W_p, \text{Дж/м}^2$ $\sigma, \text{МПа}$	
	ШХ15		40Х		65Г, 45	
Покрытие	$h = 10^{-8} - 10^{-5} \text{мм}$		$h = 10^{-8} - 10^{-5} \text{мм}$		$h = 10^{-8} - 10^{-5} \text{мм}$	
TiN	4,41	7780,42-246,04	4,11	7512,11-237,55	4,27	7649,13-241,89
AlN	3,98	6248,97-197,61	3,74	6053,61-191,43	3,86	6153,62-194,59
50TiN+50AlN	4,22	7047,25-222,85	3,95	6814,24-215,49	4,09	6933,35-219,25
75TiN+25AlN	4,05	6455,52-204,14	3,79	6250,51-197,66	3,92	6355,42-200,98
Ti	2,52	2876,86-90,97	2,40	2803,37-88,65	2,46	2841,16-89,85
TiB2	4,71	8183,13-258,77	4,42	7922,16-250,52	4,57	8055,69-254,74
TiB2	5,00	9280,75-293,48	4,67	8967,55-283,58	4,84	9127,58-288,64
Ti+TiB2	3,78	5749,09-181,80	3,55	5569,77-176,13	3,67	5661,57-179,03
HfN	3,91	5852,64-185,08	3,71	5696,54-180,14	3,81	5776,72-182,68
ZrN	4,31	7320,38-231,49	4,03	7076,76-223,79	4,18	7201,28-227,72
0,2HfN+0,8ZrN	4,27	7065,56-223,43	4,00	6838,49-216,25	4,14	6954,66-219,93
Ni	3,61	5154,65-163,00	3,45	5037,38-159,30	3,53	5097,79-161,21
Al	1,42	1785,02-56,45	1,40	1772,67-56,06	1,41	1779,11-56,26
Mg	1,16	1285,20-40,64	1,14	1275,28-40,33	1,15	1280,44-40,49
Al-3%Mg	1,41	1771,04-56,01	1,39	1758,72-55,62	1,40	1765,14-55,82
B	1,76	5077,74-160,57	1,60	4841,43-153,10	1,68	4960,99-156,88
50%Fe-25%Si-25%B	1,76	3886,25-122,89	1,60	3705,39-117,17	1,68	3796,90-120,07
50%Fe-50%Si	3,34	4581,31-144,87	3,17	4462,29-141,11	3,25	4523,46-143,04
Cu	2,40	3118,30-98,61	2,34	3077,04-97,30	2,37	3098,45-97,98
Mo	4,29	6646,62-210,18	4,07	6478,94-204,88	4,18	6565,17-207,61
Fe-63%TiN	4,26	6932,45-219,22	4,00	6717,70-212,43	4,14	6827,66-215,91
Ni-64%TiN	3,91	5907,95-186,83	3,69	5740,35-181,53	3,80	5826,34-184,24
MgO	3,37	5838,88-184,64	3,10	5604,49-177,23	3,24	5723,67-181,00
Ag	1,70	2174,92-68,78	-	-	1,69	2166,34-68,51
Ag-76%MgO	3,57	5466,02-172,85	5,42	-	3,46	5374,26-169,95
WC	5,81	11539,54-364,91	3,32	11150,32-352,60	5,62	11349,19-358,89
Co	3,46	4874,21-154,14	5,32	4774,72-150,99	3,39	4826,06-152,61
WC-10%Co	5,68	11009,72-348,16	4,27	10646,01-336,66	5,50	10831,94-342,54
TiN-50%TiB2	4,57	7983,95-252,47		7718,88-244,09	4,42	7854,37-248,38
Si3N4	4,51	8194,42-259,13	4,20	7905,95-250,01	4,36	8053,18-254,66
SiC	4,19	8036,78-254,15	3,88	7728,98-244,41	4,04	7885,71-249,37
TiC0,96	3,62	7283,95-230,34	3,33	6982,25-220,80	3,48	7135,50-225,64
BN	3,96	10110,62-319,73	3,63	9675,20-305,96	3,80	9896,09-312,94
Ti(B,N,C)	3,81	8777,44-277,57	3,49	8404,75-265,78	3,65	8593,91-271,76
TiSi2	1,10	3525,26-111,48	1,08	3499,66-110,67	1,09	3513,00-111,09
C	2,49	8633,95-273,03	2,26	8235,40-260,43	2,37	8437,11-266,80
TiN-Si3N4-TiSi2	2,22	5458,83-172,62	2,21	5445,15-172,19	2,22	5452,30-172,42
VN	4,15	6807,87-215,28	3,89	6586,25-208,28	4,02	6699,59-211,86
TiN/VN	4,29	7307,01-231,07	4,01	7061,56-223,31	4,15	7186,99-227,27
ZrB2	3,06	6947,14-219,69	2,79	6639,75-209,97	2,92	6795,55-214,89
Алмаз	5,10	11980,46-378,86	4,70	11502,56-363,74	4,90	11745,60-371,43
Zr	0,52	645,32-20,41	0,52	643,80-20,36	0,52	644,60-20,38
TiN/Zr	3,57	5090,22-160,97	3,42	4982,55-157,56	3,50	5038,09-159,32
AlN	3,98	6248,97-197,61	3,74	6053,61-191,43	3,86	6153,62-194,59
TiN/AlN	4,22	7047,25-222,85	3,95	6814,24-215,49	4,09	6933,35-219,25

Окончание табл. 2

Сталь	$W_p, \text{Дж/м}^2$		$\sigma, \text{МПа}$		$W_p, \text{Дж/м}^2$		$\sigma, \text{МПа}$		$W_p, \text{Дж/м}^2$		$\sigma, \text{МПа}$	
	ШХ15				40X				65Г, 45			
Покрытие	$h = 10^{-8} - 10^{-5} \text{мм}$				$h = 10^{-8} - 10^{-5} \text{мм}$				$h = 10^{-8} - 10^{-5} \text{мм}$			
TiB2+25TiN	4,64	8084,10-255,64	4,34	7820,97-247,32	4,49	7955,54-251,58						
TiB2+50TiN	4,57	7983,95-252,47	4,27	7718,88-244,09	4,42	7854,37-248,38						
TiB2+75TiN	4,26	7049,60-222,93	3,99	6822,55-215,75	4,13	6938,70-219,42						
Cr2N	4,04	6313,77-199,66	3,80	6122,90-193,62	3,92	6220,69-196,72						
Cr2N/Ni	3,88	5782,50-182,86	3,68	5628,35-177,98	3,78	5707,54-180,49						
HfB2	3,02	7008,52-221,63	2,76	6697,17-211,78	2,89	6854,96-216,77						
ZrN	4,29	7303,80-230,97	4,01	7058,51-223,21	4,15	7183,86-227,17						
ZrN/Cu	3,82	5605,65-177,27	3,63	5465,48-172,83	3,72	5537,57-175,11						
ZrN/Ni	4,10	6367,94-201,37	3,87	6184,76-195,58	3,98	6278,71-198,55						
TiN/Si3N4	4,46	7989,63-252,65	4,16	7711,15-243,85	4,31	7853,32-248,34						
WC	5,76	11335,85-358,47	5,38	10956,42-346,47	5,57	11150,33-352,60						
WC/DLC/WS2	5,17	11107,94-351,26	4,78	10686,48-337,94	4,98	10901,14-344,72						
Nb	2,12	2836,33-89,69	2,08	2809,54-88,85	2,11	2823,48-89,29						
Fe-Nb-B	1,76	3789,68-119,84	1,60	3613,32-114,26	1,68	3702,55-117,08						
Cr	3,17	4340,99-137,27	3,31	-	3,12	4301,41-136,02						
Fe-25Cr-0,2Ti-0,12C	3,46	4857,95-153,62	5,36	4751,35-150,25	3,39	4806,30-151,99						
WC-6%Co	5,74	11224,06-354,94	3,07	10850,05-343,11	5,55	11041,21-349,15						
ZrO2	3,20	4349,81-137,55	-	4258,57-134,67	3,14	4305,64-136,16						
ZrO2+3%Y2O3	3,19	4321,02-136,64	3,06	4230,52-133,78	3,13	4277,21-135,26						
Al2O3	4,16	7306,59-231,05	3,87	7045,03-222,78	4,02	7178,47-227,00						
Cu-0,4Cr	2,74	3626,90-114,69	2,66	3570,50-112,91	2,70	3599,71-113,83						
Cu-0,4Cr	2,66	3502,16-110,75	2,58	3449,71-109,09	2,62	3476,89-109,95						
Cu M1	4,46	7989,63-252,65	4,16	7711,15-243,85	4,31	7853,32-248,34						
n-TiN/a-SiNx	3,50	4922,04-155,65	3,34	4808,86-152,07	3,42	4867,16-153,91						
Ti-Si-N	3,95	5924,64-187,35	3,75	5771,35-182,51	3,85	5850,14-185,00						
AlN/Cu	3,50	4922,04-155,65	3,34	4808,86-152,07	3,42	4867,16-153,91						
TiN/Cu	3,95	5924,64-187,35	3,75	5771,35-182,51	3,85	5850,14-185,00						
Zr	1,33	1700,52-53,78	1,31	1690,42-53,46	1,32	1695,69-53,62						
Mo	4,33	6668,12-210,86	4,15	6528,27-206,44	4,25	6600,41-208,72						
W	4,56	7560,87-239,10	4,29	7334,95-231,95	4,43	7450,72-235,61						
Ag	1,70	2174,92-68,78	1,67	2157,03-68,21	1,69	2166,34-68,51						
nc-TiN/a-Si3N4	4,46	7989,63-252,65	4,16	7711,15-243,85	4,31	7853,32-248,34						
nc-TiN/a-Si3N4/TiSi2	2,22	5458,83-172,62	2,21	5445,15-172,19	2,22	5452,30-172,42						
Co-6%WCнано	3,73	5401,08-170,80	3,56	5282,61-167,05	3,65	5343,69-168,98						
Co-2%WCнано	3,55	5052,76-159,78	3,40	4946,95-156,44	3,48	5001,53-158,16						
Co-6%Wнано	3,73	5401,08-170,80	3,56	5282,61-167,05	3,65	5343,69-168,98						
Co-0,92%Al2O3нано	3,48	4905,58-155,13	3,34	4804,61-151,94	3,41	4856,71-153,58						
Co-3,3%Al2O3нано	3,52	4985,99-157,67	3,37	4881,16-154,36	3,45	4935,24-156,07						
ZrO2	3,20	4349,81-137,55	3,07	4258,57-134,67	3,14	4305,64-136,16						
Co-1,13%ZrO2нано	3,46	4868,35-153,95	3,32	4768,94-150,81	3,39	4820,24-152,43						
Co-2,56%ZrO2нано	3,45	4860,93-153,72	3,31	4761,62-150,58	3,39	4812,87-152,20						
Co-4,53%ZrO2нано	3,45	4850,70-153,39	3,31	4751,54-150,26	3,38	4802,71-151,88						
Zn	2,49	2965,96-93,79	2,39	2905,55-91,88	2,44	2936,73-92,87						
Zn-Ni	3,10	4107,18-129,88	2,96	4015,90-126,99	3,03	4062,95-128,48						
TiNx(0,97)/Cu(0,03)	4,41	7692,41-243,26	4,11	7430,32-234,97	4,26	7564,20-239,20						
Ti1-xAlxN(0,94)/AlN(0,05)	3,97	6219,04-196,66	3,73	6024,71-190,52	3,85	6124,19-193,66						
TaB2	4,57	8949,66-283,01	4,24	8615,29-272,44	4,41	8785,66-277,83						

3. Определено, что динамика износа на передней поверхности при обработке закаленной стали ШХ15 отличается от стали 45: сначала вблизи режущей кромки появляется одна лунка на передней поверхности, которая со временем увеличивается в длину, причем глубина лунки сохраняется и у самой режущей кромки покрытие продолжает успешно работать.

4. Принципиально доказана возможность замены шлифования точением при обработке закаленных сталей.

5. Показана возможность получения снимаемого объема материала за период стойкости, стойкости и производительности и определения режимов резания для эффективной обработки.

6. Методика позволяет определить время обработки любой поверхности закаленной детали и оценить потребность в пластинах для обработки всех деталей в партии.

7. Создана методика оценки адгезионного взаимодействия закаленных сталей 40X, 65Г, ШХ15 и стали 45 с различными материалами покрытий, которая позволяет с позиции повышения работоспособности покрытий на режущем инструменте выбирать их с учетом абразивного износа (максимум микротвердости) и адгезионного износа (минимум адгезионного сцепления).

8. Проведенные исследования позволяют определить эффективные покрытия с точки зрения максимального снимаемого объема, материала за период стойкости, величины стойкости РИ и производительности процесса резания, а также позволяет учесть адгезионное взаимодействие и, в конечном счете, определить эффективные покрытия для черновой, получистовой и чистовой обработки закаленных сталей.

9. Разработана методика оценки влияния адгезионного взаимодействия закаленных сталей 40X, ШХ15, 65Г и стали 45 с различными покрытиями, позволяющая оценить интенсивность адгезионного схватывания для плазменно-ионных покрытий  $h_{\text{п}} = 10^5$  м. и нанопокрyтия  $h = 10^{-8}$  м и проверить правильность назначения покрытия по этому критерию.

## Литература

1. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной 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.: АИНУ, 2002. – 596 с.

2. 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.: АИНУ, 2002. – 482 с.

4. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Антика, 2003. – 412 с.

5. 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.

6. Kostyuk, G.I. The effective cutting tools having the coating and hardened layers [Text]: monograph-reference book / G.I. Kostyuk. – Kh.: National aerospace university named after N. E. Gukovsky «KNAI», 2007. – 633 p.

7. 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 // Вісті Академії інженерних наук України. Спец. вип. «Машинобудування і прогресивні технології». – 2011. – Вып. 3. – С. 67 – 70.

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

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

10. 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.

11. Экспериментальное исследование шероховатости поверхности деталей при чистовом точении стали 30Х14А РИ с покрытием 0,8ZrN+0,2HfN и без него [Текст] / Г.И. Костюк, А.И. Филиппенко, К.П. Исяк, А.Н. Костюк // 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. 117 – 128.

12. Деформация стружки после получистового точения стали 39ХС и сплава ЭИ702 и чистового точения жаропрочной стали 30Х14А РИ с покрытиями [Текст] / Г.И. Костюк, В.Н. Степаненко,



Е.Г. Костюк, А.Н. Костюк, Ю.Ю. Карамышев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (63). – X., 2010. – С. 134 – 140.

13. Костюк, Г.И. Силы резания при обработке конструкционных материалов твердыми сплавами с различными покрытиями [Текст] / Г.И. Костюк, А.Ю. Миргородский, Хаки Махмуд Салех // Вопросы проектирования и производства конструкций ле-

тательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(63). – X., 2010. – С. 165 – 172.

14. Исследование износа РИ с покрытием при его моделировании на машине трения [Текст] / Г.И. Костюк, А.В. Фадеев, А.Н. Куринной, Т.П. Босенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(63). – X., 2010. – С. 165 – 172.

Поступила в редакцию 5.01.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии проектирования авиационных двигателей А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.

### ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ 45 РІЗАЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ З ПОКРИТТЯМ

*Г.І. Костюк, О.М. Мелкозьорова, Р.В. Воропай, А.О. Бреус*

Приведені залежності знімає мого матеріалу за час роботи від зносу по передній та по задній поверхні та розміру лунки РІ. На прикладі обробки загартованої сталі 45 доведено, що одного критерію ефективності обробки загартованих сталей недостатньо, а необхідно застосовувати багатокритеріальну оцінку – сумарний рейтинг, враховуючи величину знімає мого об'єму матеріалу за період стійкості, стійкість РІ та продуктивність обробки. Показано, як можливо обирати режими обробки та матеріал РІ з покриттям забезпечуючи високий сумарний рейтинг, з врахуванням адгезії.

**Ключові слова:** загартована сталь, знімає мий об'єм матеріалу за період стійкості, стійкість ріжучого інструменту, продуктивність обробки, сумарний рейтинг, матеріал РІ, покриття, адгезія.

### EFFICIENCY OF TREATMENT OF HARD-TEMPERED OF CHROMIUM STRUCTURAL STEEL OF CUTTING TOOL WITH COATING

*G.I. Kostyk, O.M. Melkozerova, R.W. Voropay, A.A. Breus*

Dependences of the removed volume of a material for an operating time from deterioration on a forward and back surface and hole CT are resulted the size. It is rotined on the example of treatment of hard-tempered chromium of structural steel, that one criterion of efficiency of treatment hard-tempered steels CT with coating not enough, and it is necessary to use a multicriterion estimation – total rating, taking into account the size of the taken off volume of material for period of durability, durability of CT and productivity of treatment. It is rotined, as possible to choose the modes of treatment and material of CT with coating providing high total rating, take into account adhesion.

**Keywords:** hard-tempered steel, taken off volume, to time durability CT, productivity of treatment, adhesion.

**Костюк Геннадий Игоревич** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. теоретической механики, машиностроения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.

**Мелкозерова Ольга Михайловна** - аспирант кафедры теоретической механики, машиностроения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина, e-mail: olja.mex@gmail.com.

**Воропай Руслан Владимирович** - аспирант кафедры теоретической механики, машиностроения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.

**Бреус Андрей Александрович** - ассистент кафедры теоретической механики, машиностроения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.