

УДК 621.91.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА МНОГОСЛОЙНОГО РЕЗЦА ПЛАСТИНЫ ПРИ РЕЗАНИИ ВЫСОКОХРОМИСТОГО БЕЛОГО ЧУГУНА

¹Баасансурэн Б., ²Пүрэвдорж Б., ¹Галаа О., ³Лыгденов Б.Д.

¹Монгольский государственный университет науки и технологии, Улан-Батор,

e-mail: baasansuren2003@yahoo.com, galaa@must.edu.mn;

²Технологический институт в Эрдэнэте, Эрдэнэт, *e-mail: batpuje@gmail.com;*

³Уханьский текстильный университет, Ухань, *e-mail: lygdenov59@mail.ru*

Высокохромистый белый чугун является основным материалом для получения рабочих частей оборудования, работающих в тяжёлых условиях горнорудного производства. В составе чугуна высокое содержание карбида хрома, поэтому он имеет высокую твёрдость и относится к группе труднообрабатываемых материалов при резании. На ремонтно-механическом заводе предприятия «Эрдэнэт» изготавливают литьевые заготовки из высокохромистого чугуна марки ИЧХ28Н2 для основных частей пульповых насосов. Производительность механической обработки этого чугуна очень мала, скорость резания не превышает 10 м/мин. Для повышения скорости резания необходимо улучшить качество поверхности отливки и применять более эффективные и прогрессивные инструменты. В настоящей работе приведены данные по применению многослойного резца вида UC5115, который позволяет повысить скорость резания в 2,5–3 раза. Этот показатель был получен в результате полнофакторных экспериментов, выполненных на максимальных значениях факторов. Внедрение новой технологии в литейном цехе позволяет применять современные резцы с высокой производительностью и оптимизировать режимы резания с целью повышения общей производительности труда. Многослойная пластина UC5115 является перспективным инструментом и за счёт увеличения скорости резания повышает производительность труда.

Ключевые слова: износостойкий чугун, механическая обработка чугуна, скорость резания, многослойный резец, полнофакторный эксперимент

INVESTIGATION OF WEAR OF A MULTILAYER PLATE CUTTER WHEN CUTTING HIGH-CHROMIUM WHITE CAST IRON

¹Baasansuren B., ²Purevdorzh B., ¹Galaa O., ³Lygdenov B.D.

¹Mongolian State University of Science and Technology, Ulaanbaatar,

e-mail: baasansuren2003@yahoo.com, galaa@must.edu.mn;

²The Institute of Technology in Erdenet, Erdenet, *e-mail: batpuje@gmail.com;*

³Wuhan Textile University, Wuhan, *e-mail: lygdenov59@mail.ru*

High-chromium white cast iron is the main material for obtaining working parts of equipment operating in harsh mining conditions. Cast iron contains a high content of chromium carbide, therefore it has a high hardness and belongs to the group of difficult-to-process materials when cutting. The repair and mechanical plant of the enterprise «Erdenet» produces cast blanks from high-chromium cast iron of the ICHH28N2 brand for the main parts of pulp pumps. The machining performance of this cast iron is very small, the cutting speed does not exceed 10 m/min. To increase the cutting speed, it is necessary to improve the quality of the casting surface and use more efficient and progressive tools. This paper presents data on the use of a multilayer cutter of the type UC5115, which allows to increase the cutting speed by 2.5-3 times. This indicator was obtained as a result of full-factor experiments performed on the maximum values of factors. The introduction of new technology in the foundry makes it possible to use modern cutters with high productivity and optimize cutting modes in order to increase overall labor productivity. The multilayer plate UC5115 is a promising tool and increases labor productivity by increasing the cutting speed.

Keywords: wear-resistant cast iron, mechanical processing of cast iron, cutting speed, multilayer cutter, full-factor experiment

Высокохромистый износостойкий белый чугун (ВИБЧ) является основным материалом для производства, а также способом литья рабочих частей оборудования, работающего в условиях абразивного износа при обработке и транспортировке руды и производстве строительных материалов.

Белый чугун содержит до 25 % карбидной фазы хрома с высокой твёрдостью. И поэтому литая заготовка обладает твёрдостью выше 500 НВ. По причине такой высокой твёрдости ВИБЧ относится к группе труднообрабатываемых материалов. Как видно из исследования, при обработке

ВИБЧ токарным резанием скорость во много раз меньше, чем при резании серого чугуна. В частности, если серый чугун марки СЧ35 можно обрабатывать резцом ВК6-М со скоростью выше 120 м/мин, то при обработке чугуна марки ИЧХ28Н2 скорость резания не превышает 10 м/мин [1–3].

На ремонтно-механическом заводе предприятия «Эрдэнэт» из белого чугуна марки ИЧХ28Н2 производятся такие детали, как рабочее колесо, внутренний корпус, защитный диск, являющиеся рабочими частями насоса марки ГРАТ-1400/40, передающего рудноводную смесь (пульпа) (рис. 1).



Рис. 1. Рабочее колесо, внутренний корпус, защитный диск насоса марки Грат-1400

Рабочие части насоса по отдельности имеют вес от 260 до 750 кг, и в некоторых ответственных частях поверхности необходима механическая обработка, на что расходуется в среднем 11–16 ч. Поэтому производительность механической обработки ВИБЧ крайне низка.

Технология механической обработки высококромистого чугуна марки ИЧХ28Н2

В некоторых поверхностях литьевых заготовок в соответствии с рабочими чертежами и техническими требованиями производится механическая обработка резанием, обеспечивающая необходимую точность размерности для сборки насоса. Перед механической обработкой заготовки подвергают термической обработке для снижения твердости, чтобы улучшить обрабатываемость отливки. Ниже рассмотрим операцию токарной обработки трёх видов деталей по отдельности.

Обработка защитного диска. Вес 260 кг. Обработка производится на карусельном станке модели 1510. В качестве инструмента используется твердосплавный резец типа ВК6. Последовательность операций:

1. Продольное точение поверхности на размер (51 мм).
2. Точение торцевой поверхности ($\varnothing 800$ мм).
3. Проточка фаски размером $2 \times 45^\circ$ на поверхности $\varnothing 800$ мм.
4. Разворот и проточка поверхности размером $\varnothing 412$ и $\varnothing 390$ мм.
5. Проточка торцевой поверхности размером $\varnothing 412$ – $\varnothing 460$ мм.

6. Проточка на ширину 54 мм продольно на поверхности диаметром в $\varnothing 460$ мм.

7. Подрезка торцевой лицевой поверхности $\varnothing 390$ мм.

Обработка рабочего колеса. Вес 390 кг. Обработка осуществляется на токарном станке модели 1М165 с применением твердосплавного резца ВК6. Производятся следующие операции:

1. Проточка внешней поверхности $\varnothing 178$ мм.

2. Проточка фаски с размером $2 \times 45^\circ$.

3. Проточка поверхности длиной $\varnothing 145$ и 136 мм на внутреннем конце внешней лицевой поверхности $\varnothing 178$ мм.

4. Продольная проточка лицевой поверхности размером $\varnothing 178$ мм.

5. Проточка фаски размером $2 \times 45^\circ$ на конце лицевой поверхности размером $\varnothing 178$ мм.

6. Перевернуть, закрепить и сделать проточку поверхности с другой стороны. Подрезать торец внутренней лицевой поверхности размером $\varnothing 178$ мм.

7. Проточка фаски размером $2 \times 45^\circ$ на конце внутренней лицевой поверхности размером $\varnothing 178$ мм.

8. Осуществить торцевание поверхности $\varnothing 450$ мм.

Обработка внутреннего корпуса. Используется карусельный станок модели 1532.

1. Подрезка торца внутренней поверхности диаметром в $\varnothing 800$ мм.

2. Проточка фаски размером $2 \times 45^\circ$ на внутренней поверхности диаметром $\varnothing 800$ мм.

3. Проточка кольцевой поверхности между $\varnothing 800$ и $\varnothing 840$ мм.

Таблица 1

Показатели режима обработки ВИБЧ

Детали	Станок	Частота оборотов, об/мин	Подача, мм	Глубина, мм
Рабочее колесо	1M165	5–7	0,2–0,3	3–5
Внутренний корпус	1532	1,6–2,5	0,3–0,5	3–5
Защитный диск	1510	5–7	0,3–0,5	3–5

4. Подрезка торца внутренней поверхности диаметром в $\varnothing 840$ мм.

5. Разворот, закрепка и расточка с другой стороны. Подрезка торца внутренней поверхности диаметром в $\varnothing 215$ мм.

6. Подрезка торца поверхности диаметром в $\varnothing 690$ мм.

Время обработки одного продукта рабочей части составляет приблизительно: для внутреннего корпуса – 16 ч, для рабочего колеса – 13 ч, для защитного диска – 11 ч.

В условиях ремонтно-механического завода при точении частей, отлитых из высокомарганцевистого белого чугуна, режим выбирается согласно данным табл. 1.

Такие малые показатели режима обработки высокомарганцевистого белого чугуна, помимо высокой твёрдости отливки, напрямую зависят от неравномерности её поверхности, дефектов и количества неметаллических примесей.

С 2012 г. при производстве отливок ремонтно-механического завода была внедрена вакуумная формовочная технология. Также с внедрением с 2020 г. новой технологии полуавтоматической линии по формовке с затвердеванием и охлаждением резко улучшилось качество поверхности от-

ливки. Эти процессы давали возможность разработки новых режимов механической обработки и использования новых видов резцов с более высокой стойкостью [4–6]. В настоящей работе были проведены эксперименты по использованию многослойной пластины U5115 в процессе резания ВИБЧ, определены режимы обработки и проверена стойкость этого вида резца.

Материалы и методы исследования

В исследовательской работе было проведено резание предварительно подготовленной чугунной заготовки многослойной пластины UC5115 в определенном режиме обработки и получено значение стойкости резца, определяемый его износом. При этом использовали метод планирования полногофакторного эксперимента.

Входными параметрами экспериментов являются такие факторы, как скорость резания (X_1), подача (X_2) и глубина резания (X_3), являющиеся основными элементами режима токарной обработки, а в качестве параметра выхода была выбрана стойкость резца (T).

Влияющие факторы на процесс износа резца во время эксперимента и связи параметров выхода показаны на рис. 2.

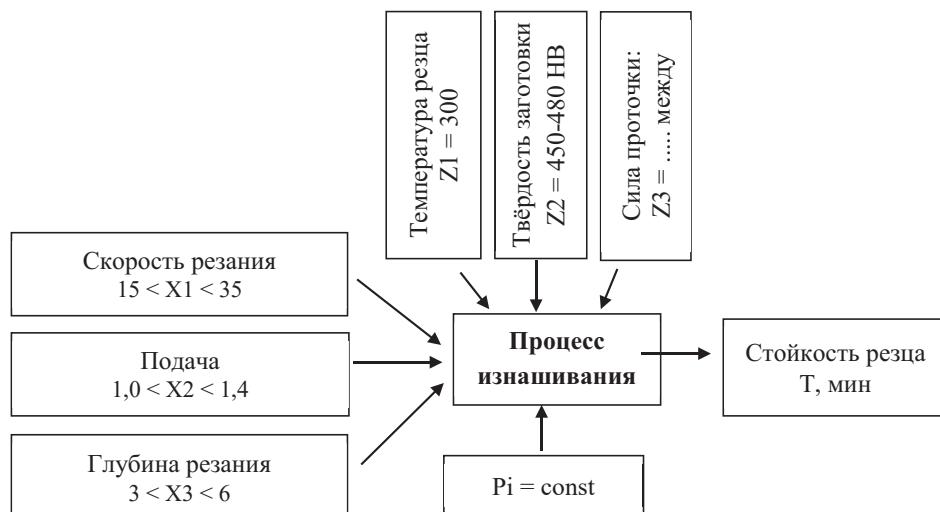


Рис. 2. Факторы, влияющие на процесс износа твёрдосплавной пластины UC5115

Учитывая, что факторы, влияющие на изнашивание токарного резца, взаимозависимы, было выбрано уравнение регрессии полуквадратного вида. Математическая модель стойкости резца выписывается суммой влияния каждого фактора и их комбинированных действий. Число опытов определяется уравнением вида $N = 2^k$, где k – число факторов:

$$T = \epsilon_0 + \epsilon_1 X_1 + \epsilon_2 X_2 + \epsilon_3 X_3 + \epsilon_{12} X_1 X_2 + \\ + \epsilon_{13} X_1 X_3 + \epsilon_{23} X_2 X_3 + \epsilon_{123} X_1 X_2 X_3$$

где ϵ_i и ϵ_{ij} – коэффициенты регрессий.

Результаты эксперимента были получены по следующей последовательности:

1. Выходные параметры, такие как математическое среднее \bar{T} , дисперсия D_i и среднее квадратное отклонение σ_T стойкости резца, определяются следующим образом:

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{n}, \quad (1)$$

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{n-1}, \quad (2)$$

$$\sigma_T = \sqrt{D_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{n-1}}. \quad (3)$$

2. Большая разница в значениях измерения определяется следующим соотношением по стандарту ГОСТ 11.002-73:

$$U_{max} = \frac{T_{i,max} - \bar{T}}{\sigma_i}; \quad U_{min} = \frac{\bar{T} - T_{i,min}}{\sigma_i}. \quad (4)$$

3. При значении вероятности погрешности $\alpha = 0,1$ и доверительной вероятности $p = 0.9$ проверяется однородность дисперсий экспериментов с использованием критерия Фишера.

$$F = \frac{D_{max}}{D_{min}} \leq F_{tab}. \quad (5)$$

Если $F < F_{tab}$, то дисперсии считаются однородными. Также еще для оценки однородности дисперсий кроме критерия Фишера используется критерий Кохрена:

$$G_p = \frac{D_{max}}{\sum_{i=1}^n D_i} \leq G_{tab}. \quad (6)$$

В случае обеспечения критериев Фишера и Кохрена дисперсия воспроизводимости (D_{soc}) определяется следующей формулой:

$$D_{soc} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{N}. \quad (7)$$

4. Значение коэффициентов математической модели определяется по следующим формулам с использованием метода наименьших квадратов:

$$B_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{T}_i}{N}, \quad (8)$$

$$B_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{i,j} \bar{T}_i}{N}, \quad (9)$$

где i – номер эксперимента; j – номер фактора; N – количество экспериментов.

5. Уровень значимости коэффициента регрессий оценивается следующими двумя методами.

– Сравнение абсолютного значения коэффициента с его доверительным интервалом.

– Использование коэффициента t распределения Студента.

По первому методу должны определить дисперсии коэффициента регрессий $D(bi)$ и среднеквадратическое отклонение σ_b следующими формулами:

$$D(bi) = \frac{D_i}{n \cdot N}, \quad (10)$$

где n – число повторяемости опытов эксперимента, N – число опытов эксперимента.

Среднеквадратическое отклонение или погрешность коэффициента регрессий:

$$\sigma_b = \sqrt{D(bi)}. \quad (11)$$

Условный промежуток:

$$\Delta b_i = \pm t_{\tau} \cdot \sigma_b, \quad (12)$$

где t_{τ} – степень свободы, зависящая от f , который определяется формулой $f = (n-1) \cdot N$.

Значение t берется от табл. 14 [1]. Если значение коэффициента больше значения условного промежутка, то этот коэффициент считается значимым.

При определении вторым методом коэффициент t_p Студента определяется следующей формулой на каждом члене регрессии:

$$t_p = \frac{B_i}{\sigma_b}. \quad (13)$$

Если значения t_p , определенные на каждом члене регрессий, больше значения таблицы $t_p > t_{\tau}$, то значения члена считаются значимым.

После оценки значения коэффициентов регрессии определяется адекватность D_{ad} дисперсий:

$$D_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{N - (k+1)} \quad (14)$$

В формуле (14) k – количество факторов, ε_i – отличие значений эксперимента от значений, определенных математической моделью:

$$\varepsilon_i = Y_i - (a_0 + \sum a_j X_{ji}). \quad (15)$$

7. Если соотношение D_{ad} и D_{soc} меньше значения таблицы Фишера, они считаются однородными.

$$\frac{D_{ad}}{D_{soc}} < F_{tabl}. \quad (16)$$

Если будет доказано, что вышеуказанные дисперсии являются однородными, то модель регрессий, установленная экспериментом, считается адекватной. Если модель является неадекватной, то будет выбрана модель с большей или квадратной степенью, чем первая выбранная модель.

Экспериментальные работы по определению стойкости пластины были проведены на станке 1М63. Во время эксперимента процесс резания был под постоянным наблюдением и было видно, что с достижением максимального износа пластины процесс резания явно ухудшался и наблюдались следующие признаки: возник-

новение вибрации, высокий перегрев резца, воспламенение стружек, очень шероховатая поверхность обработки. Относящееся к этому периоду время выражает стойкость резца. Общий вид и строение многослойной пластины U5115 показаны на рис. 3.

Пластина состоит из нескольких слоев: наружный слой – нитрид титана (TiN). Далее идет слой оксида алюминия (Al_2O_3), который за счет тугоплавкости защищает основной слой. И, наконец, карбонитрид титана ($TiCN$), который увеличивает твердость и износостойкость пластины [7, 8].

Результаты исследования и их обсуждение

В результате полнофакторного эксперимента вида 2^3 были определены зависимости стойкости многослойной пластины U5115 от скорости (v), подачи (s) и глубины (t) резания. Каждый эксперимент был проведен с шестикратным повтором.

Результаты эксперимента показаны в табл. 2.

Выходные параметры или стойкость пластины и другие показатели приведены в табл. 3.

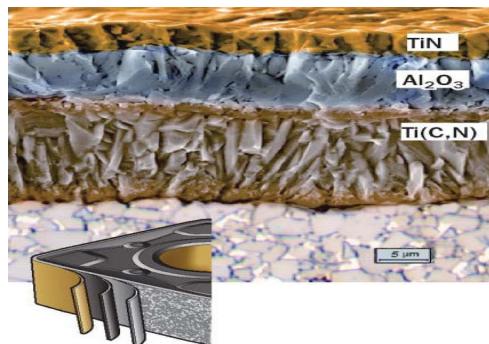


Рис. 3. Общий вид и строение многослойной пластины U5115



Рис. 4. Эксперименты на заготовке чугуна ИЧХ28Н2

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования

№	X_0	Факторы и их совместное действие						Стойкость пластины, мин							
		v	s	t	vs	vt	st	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6		
		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3								
1	+	15	1,0	3	+	+	+	–	52	53	56	53	55	55	54
2	+	35	1,0	3	–	–	+	+	32	34	28	26	27	33	30
3	+	15	1,4	3	–	+	–	+	40	42	38	37	39	38	39
4	+	35	1,4	3	+	–	–	–	24	21	21	25	23	24	23
5	+	15	1,0	6	+	–	–	+	44	46	53	48	49	48	48
6	+	35	1,0	6	–	+	–	–	26	24	25	22	20	21	23
7	+	15	1,4	6	–	–	+	–	24	23	28	28	27	26	26
8	+	35	1,4	6	+	+	+	+	10	11	7	9	12	11	10

Таблица 3

Обработка результатов эксперимента

Номер эксперимента	Стойкость T_i , мин	Дисперсия D_i	Среднее квадратное отклонение σ
1	54	6,4	2,6
2	30	14,8	3,8
3	39	8,4	2,9
4	23	8,4	2,9
5	48	5,1	2,3
6	23	3,5	1,9
7	26	6,8	2,6
8	10	3,5	1,9

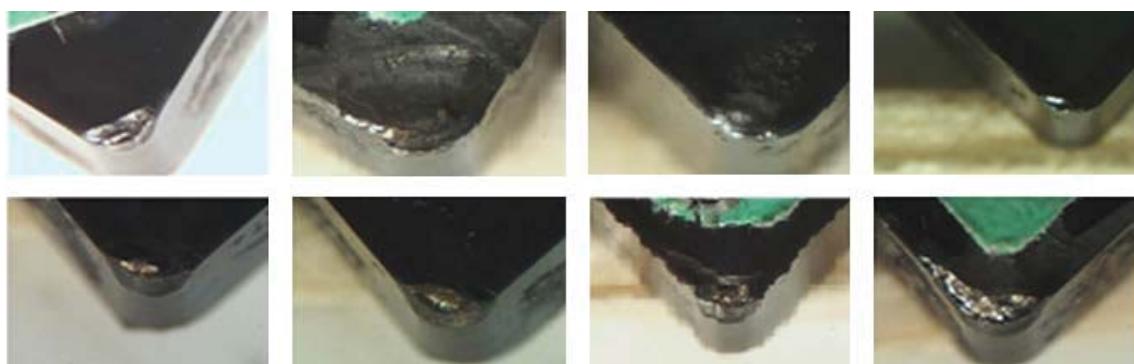


Рис. 5. Динамика износа пластины

Коэффициенты регрессий были определены методом наименьших квадратов:

$$B0 = 26,1, B1 = -17, B2 = -16,5, B3 = -7,1, \\ B12 = 12,6, B13 = 3,7, B23 = 3,5, B123 = -0,4$$

После статистической обработки результатов эксперимента и проверки по критериям

Фишера и Кохрена, регрессионное уравнение стойкости резца T было определено в зависимости от режима резания таким образом:

$$T_p = 149,1 - 1,2v - 520s + 7,8t + 5vs - 90st.$$

Состояние изнашивания резцов в процессе эксперимента показано на рис. 5.

Заключение

1. Внедрение новой технологии в литьевом цехе позволяет применять современные резцы с высокой производительностью и оптимизировать режимы резания с целью повышения общей продуктивности труда.

2. Многослойная пластина UC5115 является перспективным инструментом и за счет увеличения скорости резания повышает производительность труда.

3. Разработана следующая модель регрессий износа пластины в зависимости от скорости, подачи и глубины резания:

$$Tr=149,1 - 1,2v - 520s + 7,8t + 5vs - 90st.$$

4. Адекватность регрессий была проверена по соответствующей стандартной методике.

5. При резании с использованием многослойной пластины UC5115 скорость резания по сравнению с ВК6-М может быть увеличена в 2–3 раза.

Список литературы

1. Авдай Ч., Энхтуяа Д. Методика исследовательской работы. 2010. 365 с.

2. Дядюра К.О., Юнак А.С. Использование современных инструментальных материалов при механической обработке резанием износостойкого чугуна ИЧ210Х30Г3 // Резание и инструмент в технологических системах. 2013. Вып. 83. С. 100–109.

3. Максим Ю.В., Верещака А.С., Верещака А.А., Бубликов Ю.И., Крючков К.В., Козлов А.А. Высокоэффективные слоистые инструментальные материалы с нанодисперсными многослойными покрытиями широкой области применения. Университет машиностроения, МГТУ «Станкин», 2012. С. 230–238.

4. Лыгденов Б.Д., Баасантурэн Б., Оюунбат Г., Бутуханов В.А. Оптимизация режимов резания износостойкого чугуна твердым сплавом нового вида // Проблемы механики современных машин. 2018. Т. 1. С. 238–247.

5. Нетребко В.В. Влияние химического состава высокочромистых чугунов на обрабатываемость резанием // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2016. № 1 (61). С. 122–130.

6. Пурэвдорж Б. Исследование лазерной обработки высокочромистого белого чугуна // Отчет исследовательской работы по проекту поддержки высшего образования Монголии по финансированию Азиатского банка развития. 2016–2017 гг. С. 150.

7. Ravi A.M., Murigendrappa S.M., Mukunda P.G. Machinability Investigations on High Chrome White Cast Iron Using Multi Coated Hard Carbide Tools. Trans Indian Institute Metal (2014). Р. 485–502.

8. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В., Родионов Д.А., Порохин С.С. Исследование теплового и напряженного состояния режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях резания // Технология машиностроения. 2010. № 6. С. 11–16.