

Лапач С.Н. Оптимизация режимов обработки жаропрочных никелевых сплавов инструментом из сверхтвердого материала / Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. Научно-технический сборник в 2-х томах, –Т. 2. –Краматорск: –1997, –С. 122-128.

Для высокоэффективной обработки ЖПНС наряду с повышением технологических режимов точения необходимо иметь относительно высокую стойкость инструмента из ПСТМ. Выбор правильной ширины и угла наклона фаски зависит от продольной подачи, глубины резания, скорости резания. Аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между этими параметрами для данного класса обрабатываемых инструментальных материалов отсутствуют из-за высокой сложности технологической системы и трудности их получения.

Применение робастных планов эксперимента и современных средств обработки и анализа математических многофакторных моделей позволило провести оптимизацию геометрических параметров резцов и режимов резания в многокритериальной постановке и провести анализ происходящих при обработке процессов. Полученная по многофакторным математическим моделям информация и найденные оптимальные условия были использованы для установления основных закономерностей точения никелевых сплавов инструментом из ПСТМ.

Кл. сл.

Регрессионный анализ, многокритериальная оптимизация, режимы точения, стойкость инструмента, жаропрочные никелевые сплавы

Linear regression, multicriteria optimization, cutting-tool life, heat-resistance alloy

Оптимизация режимов обработки жаропрочных никелевых
сплавов инструментом из сверхтвердых материалов

В современном машиностроении в качестве конструкционных материалов широко применяют жаропрочные сплавы на основе никеля. Они способны работать в нагруженном состоянии при температурах до 1200° С. Наряду с уникальными эксплуатационными свойствами жаропрочные никелевые сплавы (ЖПНС) характеризуются чрезвычайно низким коэффициентом обрабатываемости. По сравнению с углеродистой сталью Ст. 45 скорость их резания ниже в 10-20 раз и для твердосплавного инструмента группы ВК не превышают 0,3...0,5 м/с. При незначительном увеличении указанной скорости резания термостойкость твердосплавных резцов снижается настолько, что может произойти прекращение процесса резания из-за разрушения режущей кромки в процессе обработки одной детали.

Для повышения скорости резания ЖПНС применяют инструмент из поликристаллического сверхтвердого материала (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ), например, разработанный в ИСМ НАН Украины киборит. Применение нового инструментального материала позволяет выполнять обработку точением на скоростях резания до 5-6 м/с, в 1,5 - 2,0 раза повысить продольную подачу. Это обусловлено высокой твердостью и термостойкостью нового инструмента, а также значительной химической инертностью КНБ к материалу обрабатываемой заготовки из никелевого сплава. Однако для высокоэффективной обработки ЖПНС наряду с повышением технологических режимов точения необходимо иметь относительно высокую стойкость инструмента из ПСТМ. Предварительные исследования показали, что с увеличением скорости резания стойкость резцов из киборита снижается менее интенсивно чем стойкость твердосплавных резцов. Поэтому необходимо использовать все резервы для повышения стойкости инструмента на

повышенных скоростях резания. Одним из таких резервов является геометрия режущей части инструмента. Выбор оптимальных геометрических параметров резцов из ПСТМ имеет чрезвычайно важное значение для повышения стойкости инструмента и производительности процесса обработки никелевых сплавов. Обработку жаропрочных сталей и сплавов на повышенных скоростях рекомендуют выполнять с минимально возможными углами в плане φ и φ_1 . Этим требованиям удовлетворяют пластины круглой формы. Они обладают наибольшей прочностью режущей кромки. При механическом закреплении круглых пластин в гнезде державки эффективно используется вся длина режущей кромки. Одна круглая пластина диаметром 7 мм выдерживает 4-5 поворотов до её полного износа и снятия с державки резца. Применение заточенных по задней поверхности пластин, позволяющих увеличить передний угол γ , не дает заметного повышения стойкости инструмента из ПСТМ, тогда как применение режущих пластин цилиндрической формы с двумя режущими кромками позволяет, соответственно, в два раза увеличить рабочую длину режущей кромки и, следовательно, повысить эффективность использования ПСТМ. Выбор правильной ширины и угла наклона фаски зависит от продольной подачи, глубины резания, скорости резания. Аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между этими параметрами для данного класса обрабатываемых инструментальных материалов отсутствуют из-за высокой сложности технологической системы и трудности их получения.

Следует обратить внимание на приверженность исследователей к получению аналитических зависимостей на основе законов физики, химии, теоретической механики и пр. Как правило, для современных технологических систем такие попытки заканчиваются неудачей: или такие зависимости не удается построить, или же построенные зависимости не обеспечивают достаточной точности описания реальной технологической системы. Это связано с тем, что для получения удовлетворительной точности нужно иметь намного больше исходной информации, чем имеется у исследователя и поэтому допущения и

предпосылки, лежащие в основе использования тех или иных законов, оказываются необоснованными. Наиболее надежным путем получения многофакторных зависимостей в настоящее время является экспериментально-статистический. Странно при этом видеть отношение к полученным таким способом зависимостям как к некоторым второсортным, так называемым эмпирическим. Следует напомнить, что практически все законы физики получены эмпирическим путем, являются по сути некоторыми аппроксимациями. Тяготение к детерминированным теоретико-аналитическим моделям является использованием устаревшей парадигмы, соответствующей скорее прошлому веку и его требованиям. В современной науке парадигмой является стохастический автомат [4]. Получение моделей, отражающих механизмы явлений на современном этапе с помощью экспериментально-статистических методов возможно [1, 3, 8], хотя и связано со значительными трудностями [1, 2, 3, 8]. Некоторые вопросы, связанные с получением регрессионных моделей, отражающих структуру взаимосвязей и позволяющих исследовать механизмы происходящих явлений рассмотрены в [5, 6, 7]

При точении жаропрочных сталей и сплавов преобладает износ по задней поверхности инструмента. Величина износа h_z измерялась на малом инструментальном микроскопе мод. МИ-2 с ценой деления 5 мкм. Для повышения точности измерения круглая режущая пластина из киборита устанавливалась и закреплялась на столе микроскопа таким образом, чтобы передняя и опорная поверхности пластины были перпендикулярными плоскости измерения микроскопа.

Для определения стойкости T инструмента в системе координат время - износ по 2...3 точкам, близким к области критериального износа выполнялось построение участка кривой износа инструмента. В качестве критерия износа был принят износ по задней поверхности $h_{zкр} = 0,4$ мм. В точке пересечения кривой износа с линией критериального износа определялась стойкость инструмента для данных режимов обработки.

По известным в технологии металлообработки зависимостям, устанавливающим связь между режимными параметрами обработки (v , S , t), диаметром заготовки, найденным значением стойкости T и показателями производительности обработки, определялись: длина пути резания L , площадь обработанной поверхности S , объем удаляемого материала V .

Для исследования были выбраны следующие факторы.

1. Скорость резания ($1,68$ (100); $4,19$ (250) ; $6,70$ (400)) м/с (об/мин). Нижний уровень определяется скоростью, при которой стойкость инструмента из киборита выше стойкости инструмента из лучшей марки твердого сплава ВК 100М. Верхний уровень скорости ограничивается возможностями существующего на предприятии п/я а-3573 оборудования для обработки деталей типа вал (станки мод. SKQ8NC, $n_{\max}=400$ об/мин).
2. Ширина переходной фаски на режущей кромке f ($0,25$; $0,50$; $0,75$ мм). Не должна превышать максимальную глубину резания ($t_{\max}=0,8$). Нижний уровень ограничен точностью приспособления, размером пластины и возможностями заточного оборудования.
3. Угол наклона фаски γ принят как положительный, принимающий значения (10 , 20 , 30 , 40) град. Нижний угол принят равным переднему углу пластины и означает фактическое отсутствие фаски на режущей кромке. Верхний уровень выбран как наибольший из встречающихся в литературных источниках.
4. Продольная подача s оказывает основное влияние на шероховатость и площадь обработанной поверхности ($0,1$; $0,2$; $0,3$; $0,4$ мм/об). Верхний уровень ограничен мощностью станка, прочностью режущей пластины и державки.
5. Глубина резания t оказывает существенное влияние на прочность режущей кромки, объем удаляемого материала и мощность резания ($0,2$; $0,4$; $0,6$; $0,8$ мм). Нижний уровень ограничен невысокой стойкостью инструмента и наличием переходной фаски, верхний - прочностью режущей кромки.

Для проведения экспериментов был сгенерирован робастный план эксперимента на

базе многофакторных регулярных планов $3^2 \times 4^3 // 32^1$. Результаты обработаны с помощью программного средства ПРИАМ [7].

После обработки получены математические модели для стойкости и пути резания (регрессоры расположены в модели по убыванию силы влияния на отклик):

$$T = 40,40 - 18,61x_4 - 10,51x_1 + 2,07z_4 + 8,24x_1u_3 - 6,04x_3 + 5,32z_1z_4 - 11,32z_1u_4 + 9,22z_2u_3 + 3,74x_1x_4 + 2,81u_3u_4 - 3,95x_1z_4 - 3,93z_3u_4 + 2,53x_3u_4 + 3,84x_3u_5 + 3,32z_3 + 3,87z_2x_4 - 2,55u_3x_4 + 2,10z_3z_5 \quad (c)$$

$$L = 114,08 - 52,47x_4 - 26,14z_1 + 24,23u_5 + 22,71z_4 - 15,59x_2u_3 + 16,86u_3 - 16,07x_3 - 14,78x_1z_5 + 19,44x_3u_4 - 12,84x_5 + 14,05x_1 + 33,57x_2u_4 + 18,54x_3z_5 - 21,13z_5 - 10,32z_2 - 12,70z_3 + 11,72z_3z_5 - 26,3u_3x_4 - 21,48x_2z_5 + 14,47z_2u_4 \quad (m)$$

Формулы перехода от X_i к x_i, z_i, v_i

$$x_1 = 0,3187(X_1 - 3,5625); z_1 = 2,1484(x_1^2 - 0,327x_1 - 0,44);$$

$$x_2 = 3,2(X_2 - 0,4375); z_2 = 2,148(x_2^2 - 0,327x_2 - 0,44);$$

$$x_3 = 0,066667(X_3 - 25); z_3 = 2,25(x_3^2 - 0,55555); v_3 = 3,75(x_3^3 - 0,91111x_3);$$

$$x_4 = 6,66667(X_4 - 0,25); z_4 = 2,25(x_4^2 - 0,55555); v_4 = 3,75(x_4^3 - 0,91111x_4);$$

$$x_5 = 3,3333(X_5 - 0,5); z_5 = 2,25(x_5^2 - 0,55555); v_5 = 3,75(x_5^3 - 0,91111x_5).$$

При этом X_i - натуральные значения факторов, а x_i, z_i, v_i - ортогональные контрасты первой, второй и третьей степени соответственно.

Результаты статистического анализа моделей приведены в таблице 1.

¹ В проведении технологических экспериментов участвовал Дальник П.Е.

Таблица 1

Показатели	Стойкость инструмента T	Длина пути резания L
Дисперсия опыта	7,417807	63,217834
Значение G-критерия резания	0,170620	0,224943
Значение G-критерия расч.	0.2809	0.2809
Коеф. множественной кор. R	0,99448	0,97090
Остаточная дисперсия	21,04143	1306,47510
Значение F-ад расчетное	2,83661	20,66623
Значение F-ад табл. ($\alpha=0.1$)	3.48	3.9
Значение F_R расчетное	64.868	9.041
Значение F_R табл.($\alpha =0.05$)	2.24	2.51

Полученные модели высокоинформативны, адекватны и устойчивы. На рис. 1 -3 представлено геометрическое изображение поверхности отклика в окрестности оптимальной точки для всех исследуемых функций при точении сплава ХН60КМВТЮБ.

Рис. 1.



Рис. 2.

Рис.3.

По моделям проведена оптимизация с использованием равномерно распределенных ЛП_τ - чисел в результате которой найдены оптимальные технологические параметры.

Результаты оптимизации сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Показатель производи- тельности	Мах зна-чение	Скорость резания v м/с	Продо- льная подача s мм/об	Глубина резания t мм	Угол наклона фаски γ град	Ширина f_y мм
Lmax	405м	5,37	0,17	0,64	-17,5	0,25
Smax	$62,02 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	5,46	0,20	0,64	-17,3	0,25
Vmax	$30,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	5,4	0,20	0,86	-15,8	0,25
Совместная оптимизация по Lmax, Smax, Vmax	L=258м S= $52,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ V= $2,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	4,97	0,20	0,41	-10,9	0,58

Анализ моделей позволил также провести оптимизацию геометрических параметров резцов из КНБ.

Проведена также компромиссная оптимизация по всем функциям (последняя строка таблицы 2).

Оптимизация режимов обработки жаропрочных никелевых сплавов ЭП741 НП и ЭП 539 ЛМ инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов позволила повысить производительность обработки (точения) в 6,6 раза, улучшить качество обработанной поверхности ($Ra < 1,25$) и снизить брак при точении дисков на 18%, общий экономический эффект от внедрения проведенных исследований на двух заводах оборонной промышленности составил 465,2 тис. руб. (на 20.11.1988г.)

Полученная по многофакторным математическим моделям информация и найденные оптимальные условия были использованы для установления основных закономерностей точения никелевых сплавов инструментом из ПСТМ.

Таким образом, применение робастных планов эксперимента и современных средств обработки и анализа математических многофакторных моделей позволило провести оптимизацию геометрических параметров резцов и режимов резания в многокритериальной постановке и провести анализ происходящих при обработке процессов.

Литература

1. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. - М.: Финансы и статистика. - 487с.
2. Загоруйко Н.Г., Орлов А.И. Некоторые нерешенные математические задачи прикладной статистики // Современные проблемы кибернетики. (Прикладная статистика). - М.: Знание, 1981. - 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Математика, кибернетика", N 8).
3. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. - К.: Техніка, 1984; Берлин: ФЕБ Ферлаб Техник, 1984. - 223с.
4. Кедровский О.И. Методологические проблемы математического познания. К.: Выща школа, 1967; 340с.
5. Лапач С.Н. Определение структуры уравнения регрессии при неортогональной матрице эксперимента // Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях. -К., 1986. -С. 95-97.
6. Лапач С.Н. Идентификация структуры линейного по параметрам уравнения регрессии. // Программные системы в автоматизации проектирования изделий машиностроения: Тез. докл. науч.-практ. семинара. 18-20 мая 1988 г. -Ижевск, С.46-48.
7. Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ) / Каталог программные продукты Украины. -К.: 1993. С. 24-27.
8. Трофимов В.П. Логическая структура статистических моделей. - М.: Финансы и статистика, 1985. - 191с.