

В. В. ПОСТНОВ, Б. Ф. УСМАНОВ

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Представлены результаты исследований обработки жаропрочных никелевых сплавов инструментом фирмы «Sandvik Coromant» с использованием аппаратного комплекса для компьютерной обработки сигналов термо-ЭДС и вибраций в зоне резания. Разработаны математические модели для определения параметров оптимального резания при точении деталей из жаропрочных никелевых сплавов инструментом фирмы «Sandvik Coromant». Полученные данные могут послужить основой для разработки новых методик определения оптимальных режимов резания, а также для составления рекомендаций по обработке жаропрочных сплавов. *Оптимизация; спектральные характеристики; процесс резания; математическая модель*

Определение оптимальных режимов работы инструмента является важной технико-экономической задачей в области машиностроения. Значение этой задачи особенно возрастает в связи с широкой автоматизацией машиностроительного производства, применением станков с ЧПУ, автоматических станочных линий и многооперационных станков. Режимы резания, обеспечивающие наименьшую интенсивность износа инструмента, приводят к получению более качественного поверхностного слоя деталей, способствующего повышению их долговечности.

Износ инструмента в значительной мере определяется температурой в зоне контакта инструмента с деталью. Для измерения температуры резания зачастую используют естественную термопару, которая по величине термо-ЭДС позволяет судить о средней температуре в зоне резания. Также значительно влияние вибраций на износ инструмента, так как они увеличивают шероховатость обработанной поверхности, снижают производительность оборудования и срок его службы. Вибрации наряду с непосредственным влиянием, оказывают и косвенное влияние через глубину и степень наклёпа поверхностного слоя на интенсивность износа инструмента. В связи с этим является актуальной оптимизация процессов механической обработки с использованием высокопроизводительных инструментальных материалов, в том числе с нанесёнными на них специальными покрытиями.

Известно [1], что на контактные явления на поверхностях инструмента влияют химический состав и механические свойства жаропрочных

деформируемых сплавов на никелевой основе. Титан с алюминием и никелем образуют интерметаллидную упрочняющую γ' -фазу. Эти частицы действуют на рабочие поверхности инструмента подобно абразиву, приводя к увеличенному износу. Большое значение имеют также структурные превращения, происходящие в этих материалах в процессе высокотемпературной пластической деформации и сопровождающиеся выпадением карбидов. Все твердые включения совместно с высокими удельными нагрузками на контактных поверхностях приводят к интенсивному абразивному и диффузионному износу режущей части инструмента, к явлениям адгезии (схватывания). Поэтому коэффициенты трения жаропрочных и нержавеющей сталей по твердым сплавам во много раз больше, чем при трении обычной стали, а размерная стойкость инструмента гораздо ниже.

Исследование термо-электрических и вибрационных явлений, происходящих в процессе обработки металлов, может существенно облегчить задачу определения оптимальных режимов резания. В данной работе проводилась токарная обработка на станке мод. 16K20 с бесступенчатым регулированием чисел оборотов шпинделя. Обрабатываемый материал – жаропрочный сплав на никелевой основе ХН73МБТЮ (ЭИ698-ВД), содержание упрочняющей γ' -фазы состава $Ni_3(Al, Ti)$ в пределах 18–19%.

Обработка производилась сменными многогранными пластинками марок H13A и S05F, производимыми фирмой «Sandvik Coromant», с геометрией режущей части $\phi=95^\circ$;

$\varphi_1=5^\circ$; $\gamma=\lambda=0^\circ$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $r=0,8$ мм. Режимы резания: глубина $t=0,5$ мм; подача $s=0,1$ мм/об; с постоянной (в пределах каждого опыта) скоростью резания. Рекомендуемый диапазон скоростей резания для пластинок марки Н13А $v = 20 - 50$ м/мин; для пластинок марки S05F $v = 40 - 100$ м/мин. Для измерения износа с точностью 0,001 мм применялся микроскоп «МИР-2» с микрометрической насадкой МОВ-1-15х. На каждой из скоростей инструмент доводился до критического износа. Устанавливались промежутки пути резания, после которых измерялся износ инструмента. Измерительная часть станда состоит из вибропреобразователя, усилителя заряда, естественной термопары и АЦП. Программный модуль, осуществляющий сбор данных и цифровую обработку сигналов, реализован с помощью программного обеспечения LabView фирмы National Instruments. Структурная схема станда приведена на рис. 1.

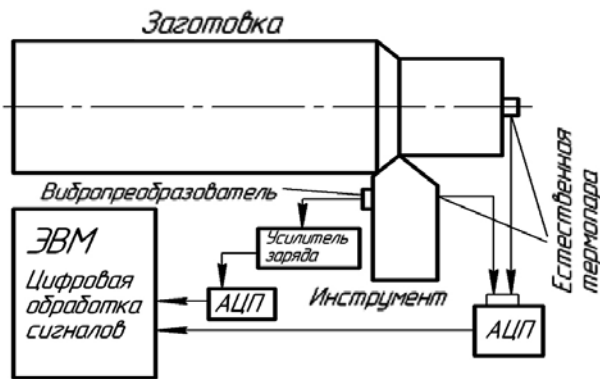


Рис. 1. Схема станда для исследования сигналов термо-ЭДС и вибраций

При рассмотрении изменения величины постоянной составляющей термо-ЭДС, АЧХ термо-ЭДС и АЧХ вибраций, была найдена определённая закономерность поведения этих характеристик при различных скоростях резания. В процессе обработки по мере увеличения износа величина сигнала термо-ЭДС имела незначительное отклонение от установившегося значения (рис. 2, а).

При скоростях, которые соответствовали наименьшей интенсивности износа инструмента, наблюдалось резкое увеличение диапазона отклонений величины сигнала термо-ЭДС (рис. 2, б).

В ходе проведения эксперимента велась запись не только постоянного значения, но и амплитудно-частотной характеристики термо-ЭДС. Также велась запись АЧХ с вибрационных датчиков, закрепленных на резце.

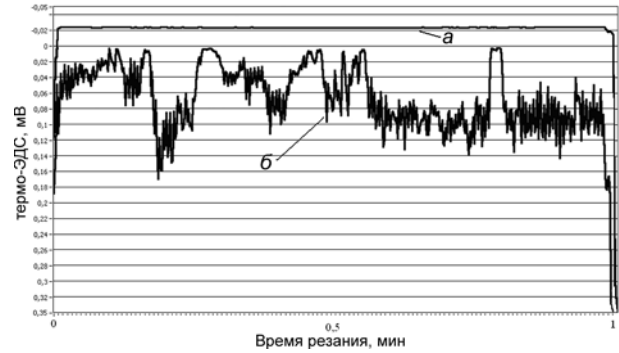


Рис. 2. График термо-ЭДС в процессе обработки: а – скорость отличная от оптимальной ХН73МБТЮ; $v=20$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $s = 0,1$ мм/об; Н13А; б – оптимальная скорость ХН73МБТЮ; $v=40$ м/мин; $t=0,5$ мм; $s=0,1$ мм/об; Н13А

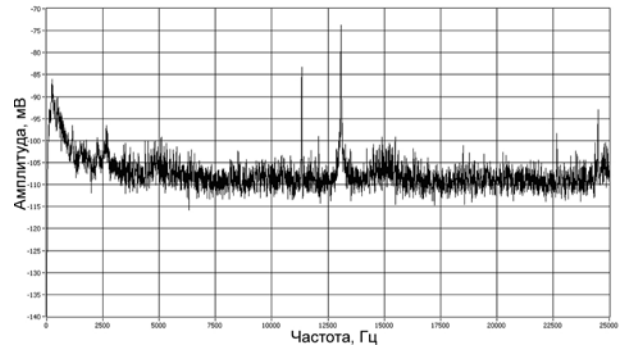


Рис. 3. АЧХ термо-ЭДС в процессе обработки на скорости отличной от оптимальной (ХН73МБТЮ; $v = 40$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $s = 0,1$ мм/об; S05F)

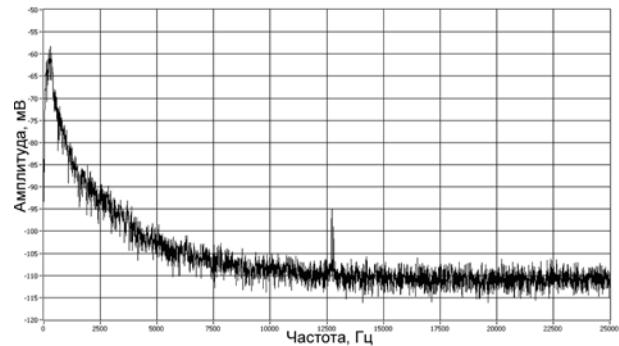


Рис. 4. АЧХ термо-ЭДС в процессе обработки на оптимальной скорости резания (ХН73МБТЮ; $v = 60$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $s = 0,1$ мм/об; S05F)

На графике АЧХ термо-ЭДС (рис. 3) амплитуда сигнала в основном незначительно изменялась в диапазоне частот от 0 до 25000 Гц. На частотах, близких к 13000 Гц, наблюдался характерный пик с большим значением амплитуды. Появление этого пика можно объяснить наличием резонансной области колебаний виброскорости инструмента в

диапазоне его собственных частот. Кроме того, зафиксировано появление пика меньшей амплитуды, у которого в процессе обработки меняется частота и при достижении критического износа инструмента значение частоты совпадает с резонансным пиком. На АЧХ термо-ЭДС, при скоростях, соответствующих наименьшей интенсивности износа инструмента (рис. 4), вышеуказанные пики практически отсутствовали и амплитуда имела монотонно убывающий характер по мере увеличения значения частоты.

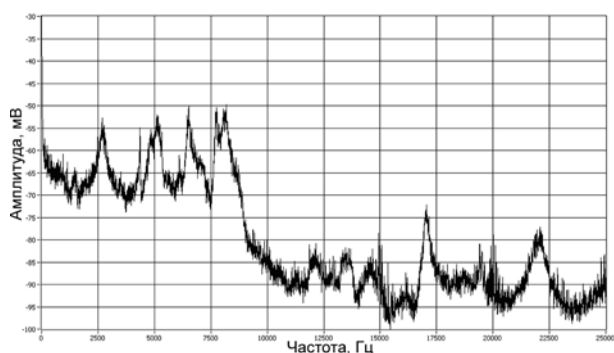


Рис. 5. АЧХ вибраций в процессе обработки на скорости отличной от оптимальной (ХН73МБТЮ; $v = 20$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $s = 0,1$ мм/об; Н13А)

На спектре АЧХ вибраций (рис. 5) обнаружено аналогичное изменение характера поведения сигнала. На оптимальных скоростях наблюдается значительное повышение амплитуды сигнала вибраций, как в зоне низких частот, так и в зоне высоких частот (рис. 6).

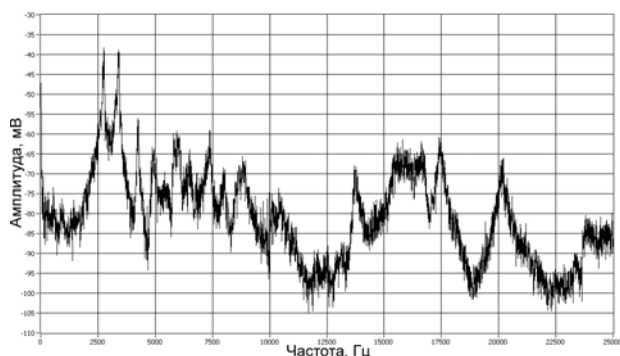


Рис. 6. АЧХ вибраций в процессе обработки на оптимальной скорости резания (ХН73МБТЮ; $v = 40$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $s = 0,1$ мм/об; Н13А)

Анализ явлений и закономерностей, обнаруженных при проведении данных экспериментов, позволяет предположить, что на скоростях резания, близких к оптимальным по критерию наименьшей интенсивности износа, происходят такие изменения состояния зоны контакта инструмента с деталью, которые

определённым образом влияют на характер поведения термо-ЭДС и вибраций. Это может быть связано с особенностями напряжённо-деформированного состояния зоны резания, изменениями характера её сплошности при достижении температуры провала пластичности обрабатываемого материала; резонансными явлениями виброскорости реза в зоне оптимальных температур резания [1, 2, 3].

Проведённые исследования показали, что термо-электрические и вибрационные характеристики процесса резания могут служить параметрами для быстрого и точного определения оптимальных скоростей резания по критерию минимальной интенсивности износа. Спектральные характеристики термоэлектрических и вибрационных сигналов можно использовать в качестве диагностических признаков состояния режущего инструмента. В связи с этим можно выделить следующие научные и прикладные задачи дальнейшего развития данных исследований: получение новых закономерностей в динамике развития износа в зависимости от свойств обрабатываемого материала и материала инструмента для решения задач оптимизации режимов резания и разработки практических рекомендаций по выбору оптимальных скоростей резания.

Математические методы планирования эксперимента позволяют включать в получаемые модели не только технологические параметры, но и характеристики, обусловленные физико-механическими свойствами материала детали. При переменных значениях глубины резания, подачи, а также при обработке группы обрабатываемых материалов с различным содержанием упрочняющей γ' -фазы, требуется проведение значительного количества экспериментов для определения зависимостей факторов оптимизации от параметров процесса резания.

При исследовании процессов резания с применением планирования эксперимента возможны два случая [4]. В первом случае необходимо найти экстремальное значение исследуемой функции. Во втором – найти характер зависимости в целом для заданного диапазона изменения факторов. Второй случай наиболее характерен; для него на математическом языке задачи формулируются следующим образом: необходимо найти такую функцию, которая определяет связь между выходом некоторого параметра оптимизации и величинами, влияющими на ход процесса, или, более кратко, найти математическую модель процесса.

В данной работе исследовалось влияние содержания упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы $Ni_3(Al,Ti)$, подачи и глубины резания при обработке группы жаропрочных деформируемых никелевых сплавов. В качестве факторов оптимизации принимались оптимальная скорость резания (v_o), оптимальная температура резания (θ_o) и шероховатость поверхности после обработки (Ra). Моделирование проводилось для следующей группы материалов: ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХН73МБТЮ (ЭИ698 ВД), ХН70ВМТЮ (ЭИ617), ХН50МВКТЮР (ЭП99), ХН62МВКЮ (ЭИ867), ХН56МВКЮ (ЭП109 ВД). В качестве режущего инструмента использовались сменные многогранные пластинки марки S05F (карбид вольфрама с трехслойным покрытием), производимых фирмой «Sandvik Coromant», с геометрией режущей части $\varphi=90^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $\gamma=\lambda=0^\circ$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $r=1,2$ мм. Режимы резания: глубина $t=0,5$ мм; подача $s=0,1$ мм/об. Для получения наиболее точной интерполяционной модели с целью прогнозирования обрабатываемости жаропрочных материалов по содержанию в них γ' -фазы был выбран некомпозиционный план первого порядка. В результате получены математические модели

$$\lg v_o = 1,834 - 0,013 \lg(\gamma') - 0,074 \lg s - 0,054 \lg t + 0,004 \lg(\gamma') \lg s + 0,003 \lg(\gamma') \lg t + 0,001 \lg s \lg t;$$

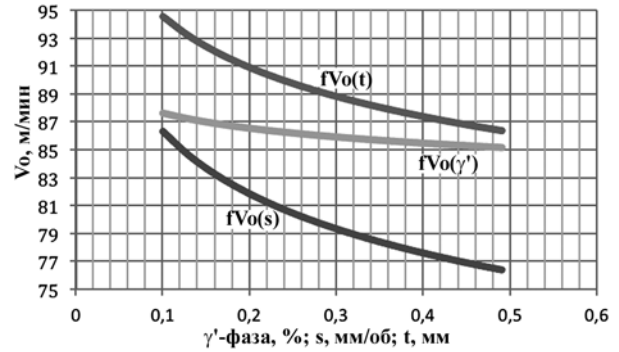
$$\lg \theta_o = 2,7 - 0,227 \lg(\gamma') - 0,025 \lg s - 0,024 \lg t + 0,002 \lg(\gamma') \lg s + 0,002 \lg(\gamma') \lg t + 0,0002 \lg s \lg t;$$

$$\lg Ra = -0,173 + 0,009 \lg(\gamma') + 0,156 \lg s - 0,001 \lg t - 0,009 \lg(\gamma') \lg s - 0,0001 \lg(\gamma') \lg t - 0,001 \lg s \lg t.$$

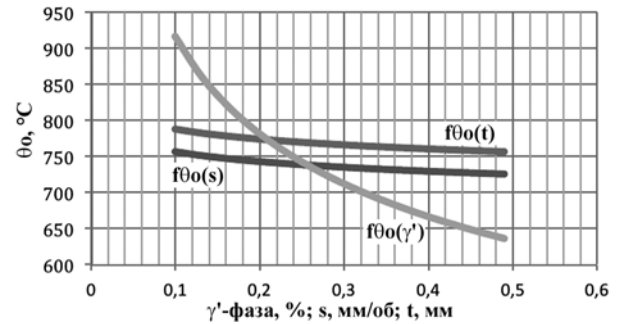
Расчет по этим формулам позволил получить графики изменения величин v_o , θ_o и Ra в зависимости от содержания γ' -фазы, подачи и глубины резания для каждого фактора оптимизации.

На рис. 7, а представлена зависимость для v_o , из которой видно, что наибольшее влияние на оптимальную скорость оказывают подача и глубина резания.

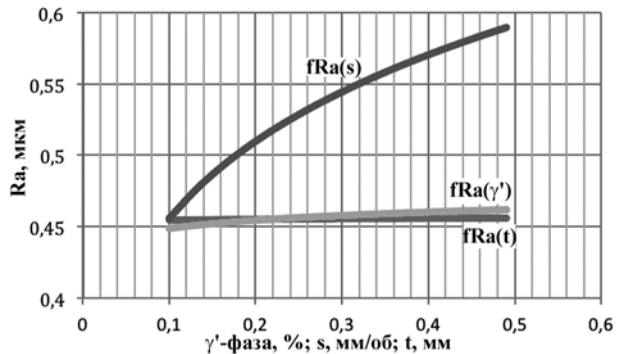
Зависимость θ_o от содержания γ' -фазы, подачи и глубины резания на рис. 7, б, подтвердила инвариантность оптимальной температуры резания к выбору элементов сечения срезаемого слоя и показала, что с увеличением содержания γ' -фазы оптимальная температура резания уменьшается при обработке инструментом марки S05F фирмы «Sandvik Coromant».



а



б



в

Рис. 7. Влияние γ' -фазы, s и t при точении группы жаропрочных никелевых сплавов инструментом марки S05F фирмы «Sandvik Coromant»: а — на оптимальную скорость резания; б — на оптимальную температуру резания; в — на шероховатость обработанной поверхности

Представленная на рис. 7, в зависимость шероховатости обработанной поверхности показала, что из исследуемых параметров резания только подача оказывает влияние на значение шероховатости.

Приведенные выше графики позволили получить адекватную модель процесса резания для целой группы жаропрочных сплавов, а также оценить характер поведения факторов оптимизации и сравнить его с априорной информацией для подтверждения найденных зависимостей, таких как инвариантность

оптимальной температуры к подаче и глубине резания, влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности. Также благодаря полученным данным можно составить таблицы рекомендуемых режимов резания жаропрочных никелевых сплавов из условия параметров оптимизации и существенно облегчить поиск оптимальных значений скорости резания для каждого материала в группе.

Для выбора оптимальных режимов резания, обеспечивающих наименьшую интенсивность износа инструмента и наилучшее качество поверхностного слоя, получены параметрические уравнения оптимальной скорости резания, оптимальной температуры резания и шероховатости поверхности при обработке в режиме оптимальной температуры, что позволит существенно сократить количество экспериментов для определения оптимальных скоростей резания.

Для жаропрочных сплавов и других труднообрабатываемых сплавов в условиях автоматизированного производства оптимальные скорости резания можно уточнять или экспериментально определять по термоэлектрическим и вибрационным сигналам, что представляет собой важное прикладное и научное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 275 с.
2. Термоэлектродвижущая сила металлов / пер. с англ.; под ред. Д. К. Белашенко. М.: Металлургия, 1980. С. 248.
3. **Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л.** Физические свойства металлов и сплавов М.: Металлургия, 1980. 320 с.
4. **Макаров А. Д., Кривошей В. М., Никитин Ю. В.** Применение математического планирования экспериментов при исследовании основных параметров процесса резания металлов: учеб. пособие. Уфа: Изд-во Уфимск. авиац. ин-та им. Орджоникидзе, 1976.

ОБ АВТОРАХ

Постнов Владимир Валентинович, доктор технических наук, профессор, зав. каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1972). Д-р техн. наук по технол. и оборуд. мех. и физ. техн. обработки (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. нестационарн. процессов резания жаропрочн. сталей и сплавов.

Усманов Булат Фаритович, магистрант кафедры мехатронных станочных систем. Иссл. в обл. процессов резания сталей и сплавов.