

УДК 621.941:534.141

О. А. Гутниченко*, **В. М. Бушля,**

Дж. М. Жу, (г. Лунд, Швеция)

П. Авдович, У. Симмонс (г. Финспонг, Швеция)

Я.-Э. Штоль (г. Лунд, Швеция)

*oleksandr.gutnichenko@iprod.lth.se

**Динамическая стабильность процесса
точения никелевых суперсплавов
при применении резцедержателя,
полученного методом послойного
лазерного спекания**

Представлены результаты сравнения стабильности работы инструментов со стандартным и экспериментальным резцедержателями при точении никелевого суперсплава Инконель 718 инструментом из оксидной керамики, армированной усами карбида кремния. Показано, что применение экспериментального резцедержателя с ячеистой пространственной структурой приводит к значительному подавлению вибрации в процессе обработки, а также стабилизации процесса резания в диапазоне скоростей 200–500 м/мин. Установлено, что преимущества инструмента со спеченным держателем связаны с демпфирующими свойствами разработанного резцедержателя.

***Ключевые слова:** динамическая устойчивость, точение, сплав Инконель 718, износ инструмента, вейвлет-анализ, “0-1” тест.*

ВВЕДЕНИЕ

Суперсплавы на основе никеля широко используются в авиационной и других отраслях промышленности для производства реактивных двигателей, газовых турбин и пр. Интерес к данному классу жаропрочных материалов связан с их способностью сохранять высокие механические свойства в экстремальных условиях эксплуатации. Наиболее известный представитель таких сплавов – Инконель 718 – обладает высокой прочностью и коррозионной стойкостью до температуры 650 °С. Высокая жаропрочность в сочетании с коррозионной стойкостью определяет широкий спектр областей применения данного материала и характеризуют его как труднообрабатываемый материал [1].

Наиболее используемые инструментальные материалы для обработки Инконель 718 – это твердые сплавы с покрытиями, керамика и материалы на основе кубического нитрида бора (КНБ). В случае высокоскоростной обработки керамические и КНБ-инструменты более перспективны и имеют ряд преимуществ с точки зрения увеличения производительности [2]. Согласно исследованиям [3, 4], точение Инконель 718 инструментом из оксидной керамики, армированной усами карбида кремния (WRA), в широком диапазоне скоростей резания характеризуется сложной зависимостью состояния обработанной поверхности и поверхностного слоя от износа инструмента. При фактически линейном увеличении износа качество поверхности и поверхно-

© О. А. ГУТНИЧЕНКО, В. М. БУШЛЯ, ДЖ. М. ЖУ, П. АВДОВИЧ, У. СИММОНС, Я.-Э. ШТОЛЬ, 2013

стного слоя значительно ухудшается в процессе обработки. Основными причинами возникновения поверхностных дефектов, согласно [3], являются разрушение карбидов TiC/NbC в процессе резания и особенности формирования поверхности – пластическое течение материала в направлении вспомогательной режущей кромки. Основные механизмы износа режущей части инструмента – диффузионный и абразивный, причем последний является доминирующим. При увеличении скорости резания к указанным механизмам подключается механическое разрушение кромки вследствие относительно низкой трещиностойкости керамики, которая, согласно [5, 6], составляет 5,2–8,8 МПа·м^{1/2}.

Проблемы абразивного износа и механических поломок инструмента традиционно решаются использованием более совершенных материалов на основе поликристаллического КНБ [7]. Другой распространенный подход – уменьшение степени ударного воздействия на инструмент путем использования активных демпферов или пассивных демпфирующих гибридных структур [8].

Компания “Siemens Industrial Turbomachinery AB” (Швеция), которая специализируется на изготовлении газовых и паровых турбин, предложила собственный способ решения данной проблемы. Компанией разработан дизайн резцедержателя с ячеистой пространственной внутренней структурой, которая должна обеспечивать дополнительные демпфирующие свойства динамической системы. Прототип резцедержателя был изготовлен с помощью прогрессивной технологии – послойного лазерного спекания порошков.

В настоящей работе выполнен сравнительный анализ устойчивости динамической системы при точении сплава Инконель 718 инструментом из WRA с использованием стандартного (СП) и полученного лазерным спеканием (ЛСП) резцедержателей в широком ($v_p = 100\text{--}500$ м/мин) диапазоне скоростей резания. Анализ динамики процесса проводили на основании результатов обработки спектров сил резания и ускорений инструмента по рассчитанным характеристикам сигнала во временной и частотной областях. Стабильность процесса оценивали с помощью анализа траекторий движения вершины инструмента.

МАТЕРИАЛЫ, УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОРУДОВАНИЕ

Динамику работы СП- и ЛСП-инструментов сравнивали в процессе точения прутка из сплава Инконель 718 в состоянии старения (46 HRC). Начальные размеры заготовки – $\varnothing 70 \times 210$ мм.

В качестве инструментального материала использовали керамические WRA пластины геометрии RNGN 120700T01020 ($\varnothing 12,7 \times 7,94$ мм). Радиус скругления режущей кромки пластин составлял 25–28 мкм, фаска – $0,1 \times 20^\circ$. Геометрия сравниваемых резцедержателей (СП типа CRDNN 3225P12-ID (ISO) и экспериментального ЛСП) была одинаковой (рис. 1); поперечный передний угол равен -6° .

Продольное точение выполняли на станке с ЧПУ SMT500 с использованием СОТС – 8 %-ной полусинтетической эмульсии Sitala D201-03 (Shell). Применяли следующие режимы резания: скорость резания $v_p = 100, 200, 300, 400$ и 500 м/мин; подача $f = 0,1$ и $0,2$ м/мин; глубина резания не изменялась и составляла $a_p = 0,3$ мм.

При изучении динамики процесса резания для последующего его анализа рассматривали спектры сил и ускорений, шероховатость обработанной по-

верхности и характеристики износа инструмента. Схема системы сбора данных с датчиков представлена на рис. 2.

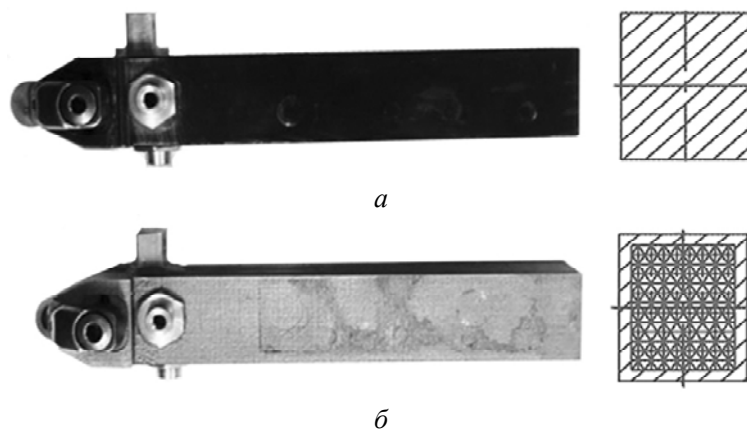


Рис. 1. Общий вид и схема внутренней структуры стандартного (а) и полученного методом послойного лазерного спекания порошков (б) резцедержателей.

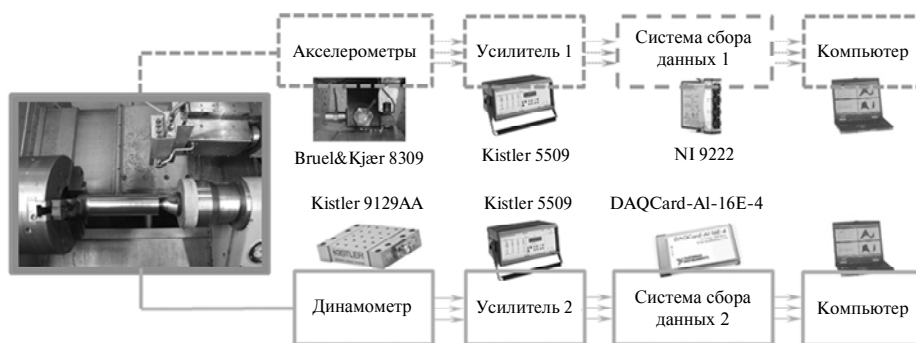


Рис. 2. Схема системы сбора данных сил резания и ускорений в процессе обработки.

Для измерения сил резания использовали трехосевой пьезоэлектрический динамометр Kistler 9129AA. Вибрации регистрировали с помощью акселерометров Bruel&Kjær 8309, расположенных взаимоперпендикулярно в трех направлениях. Запись спектров сил резания и ускорений проводили одновременно с частотами дискретизации 1 и 120 кГц соответственно. Обработку спектров проводили с помощью программных пакетов LabView и Matlab как стандартными, так и прогрессивными методами обработки сигналов. Динамическую стабильность процесса анализировали с помощью вейвлет-анализа и “0-1” теста.

Износ инструмента оценивали с помощью стереомикроскопа Leica MZ16 по площадке износа по задней поверхности (VB). Морфологию износа инструментов изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (LEO SEM 1560).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика резца в процессе точения определяется характеристиками системы станка – массой, жесткостью и демпфирующей способностью, которые рассматриваются в данном случае как постоянные величины. Переменными

величинами являются свойства используемых держателей. Кроме того, на работу инструмента влияют характеристики самого процесса – относительная скорость и координата вершины инструмента относительно заготовки, которые варьируются в процессе резания вследствие износа или поломки инструмента, изменения жесткости заготовки и зависят от особенностей развития и механизма износа инструмента, позиции инструмента вдоль заготовки и взаимодействия инструмента с заготовкой.

В общем виде поведение динамической системы реза с приведенными характеристиками может быть описано системой уравнений в матричном виде:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{k}(\mathbf{q})\mathbf{q} = \mathbf{F}_p(\mathbf{q}, t) + \mathbf{F}_d(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \quad (1)$$

где \mathbf{m} , $\mathbf{c}(\dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{k}(\mathbf{q})$ – векторы массы, коэффициентов демпфирования и жесткости рассматриваемой системы соответственно; $\mathbf{F}_p(\mathbf{q}, t)$ – вектор главной возмущающей силы, как правило, периодической, определяется режимами резания; $\mathbf{F}_d(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – вектор диссипативной силы, возникающей и изменяющейся в процессе резания, определяется условиями процесса; \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$ – векторы обобщенной координаты, скорости и ускорения соответственно.

Согласно [9], силу в направлении скорости резания можно определить как

$$F_{pz} = \xi h_1 \left(\gamma \left(\dot{z}_o - 1 \right)^2 + 1 \right), \quad (2)$$

где $\xi = f(\dot{z}_o, \mu_0, h_1)$; h_1 – теоретическая толщина срезаемого слоя; μ_0 – статический коэффициент трения; γ – константа; $\dot{z}_o = v_p - \dot{z}$ – относительная скорость инструмента; v_p – скорость резания.

Диссипативная составляющая в направлении скорости резания $F_{dz}(\dot{z}_o)$ после разложения в ряд и использования линейных членов принимает вид

$$F_{dz}(\dot{z}_o) = F(v_p) - \dot{z}F'(v_p). \quad (3)$$

Таким образом, наличие спадающих участков на кривой $F(z_p)$ приводит к снижению демпфирующих свойств динамической системы в целом.

Результирующая диссипативной силы в основной плоскости в большей степени зависит от величины площадки износа инструмента VB . Согласно [10], она может быть определена как

$$F_{dxy} = KV_m \approx \frac{VB(t)^2}{v_p} \dot{q}_{xy} = c_p \dot{q}_{xy}, \quad (4)$$

где \dot{q}_{xy} – результирующая скорость. Увеличение данной результирующей силы приводит к увеличению силы трения на задней поверхности инструмента и, соответственно, к росту силы резания. Дальнейшие рассуждения основываются на указанных зависимостях.

Анализ сил резания и вибраций инструмента

Силы резания, возникающие при обработке Инконель 718 СР- и ЛСР-инструментом в новом и изношенном (путь резания $L = 210$ м) состояниях, представлены в таблице.

Силы резания и средние значения ускорений

v_p , м/мин	f , мм/об	Силы резания $F_{CP}/F_{ЛCP}$, Н инструмента в состоянии						Средние значения амплитуд ускорений		
		новом			изношенном			$a_{CP}/a_{ЛCP}$, отн. ед.		
		z	y	x	z	y	x	z	y	x
100	0,1	210/200	270/250	100/90	400/380	800/734	300/370	0,5/0,2	0,3/0,3	0,2/0,1
200		232/240	280/300	120/120	440/425	1140/1070	440/400	1,5/0,7	0,8/0,3	0,5/0,2
300		166/170	190/220	80/90	370/425	1315/1370	440/480	2,2/0,9	1,0/0,5	0,6/0,3
400		180/200	225/255	90/110	350/400	1090/1150	360/440	2,2/0,7	1,0/0,4	1,1/0,3
500		175/160	205/260	90/110	345/350	1000/1130	360/410	3,4/0,6	1,5/0,4	0,8/0,3
100	0,2	380/340	380/350	150/130	515/500	715/610	285/240	0,6/0,5	0,7/0,2	0,4/0,6
200		350/285	324/270	130/100	485/435	880/750	340/290	2,3/1,5	1,5/0,5	0,8/0,4
300		360/348	380/410	125/130	485/505	770/780	300/315	4,4/1,3	1,8/0,7	1,4/0,3
400		278/300	240/250	100/100	410/420	780/800	280/300	6,0/1,3	2,5/0,5	2,0/0,7
500		332/270	270/310	235/220	445/400	1110/1020	370/340	8,5/1,6	5,2/0,8	2,6/0,7

Примечание. F_{CP} , a_{CP} и $F_{ЛCP}$, $a_{ЛCP}$ – силы и средние значения амплитуд ускорений при точении CP- и ЛCP-инструментом соответственно.

Силы в процессе резания возрастают преимущественно линейно (см. таблицу) за исключением случаев выкрашивания режущей пластины, которое в основном происходило по передней поверхности. Сравнительный анализ полученных результатов при различных условиях обработки показал следующее.

1. Подача $f = 0,1$ мм/об, новый инструмент. При малых скоростях резания $v_p < 200$ м/мин силы резания фактически одинаковы для обоих инструментов. При $v_p > 200$ м/мин отношение $\alpha_F = F_{CP}/F_{ЛCP}$ уменьшается до значения 0,78.

2. Подача $f = 0,1$ мм/об, изношенный инструмент. Значение коэффициента α_F составляет $\sim 1,0$ во всем диапазоне скоростей резания. Значения тангенциальной составляющей силы резания увеличивается в 2 раза, осевой – в 3–4 раза, радиальной – в 5 раз по сравнению с неизношенным инструментом.

3. Подача $f = 0,2$ мм/об, новый инструмент. Наблюдается увеличение коэффициента $\alpha_F(v_p)$ при низких скоростях резания до 1,2–1,3. При увеличении скорости обработки $\alpha_F(v_p)$ стремится к единице.

4. Подача $f = 0,2$ мм/об, изношенный инструмент. Поведение зависимостей $\alpha_F(v_p)$ идентично предыдущему случаю, но абсолютные значения сил в тангенциальном и осевом направлениях увеличиваются в 1,5 раза, в радиальном направлении – в 4–5 раз по сравнению с неизношенным инструментом (см. таблицу), что является типичным при применении круглых пластин.

При сравнении различных условий обработки видно, что при увеличении подачи нового инструмента (условия 1 и 3) значения составляющих сил резания увеличиваются в 1,5–2,0 раза, тогда как для изношенного инструмента (условия 2 и 4) разница незначительна и уменьшается при повышении скорости обработки.

Иная ситуация со спектрами ускорений. Согласно данным таблицы $a_{CP}/a_{ЛCP}(v_p)$ возрастает для всех составляющих ускорения и изменяется в пределах от 1 до 6 при увеличении скорости резания независимо от подачи.

Таким образом, установлено, что силы резания при точении стандартным и экспериментальным инструментами отличаются при заданных условиях

проведения эксперимента на $\sim 25\%$ (max). В то же время амплитуда вибраций при обработке стандартным инструментом превышает аналогичные величины при резании инструментом с ЛСР в 5–6 раз (max). То есть наблюдается значительное уменьшение уровня вибраций при точении инструментом со спеченным держателем. О подавлении вибраций за счет “улучшенных” демпфирующих свойств разработанного резцедержателя можно судить при сходных величинах износа режущей кромки инструментов и механизмах его развития в процессе обработки.

Характеристика износа инструментов

Результаты электронной микроскопии изношенных инструментов при различных условиях резания представлены на рис. 3.

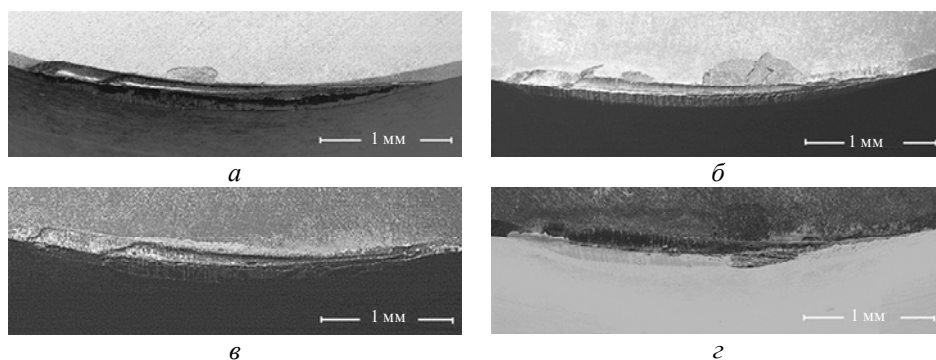


Рис. 3. Микроснимки изношенных инструментов при различных условиях резания ($v_p = 200$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (а, в); $v_p = 400$ м/мин; $f = 0,2$ мм/об (б, г)) СР- (а, б) и ЛСР-инструментом (в, г).

Оценку работоспособности проводили по величине удельного износа, оцениваемой как отношение величины площадки износа VB_{\max} к пути резания L : $WR = VB_{\max}/L$. Результаты измерений представлены на рис. 4.

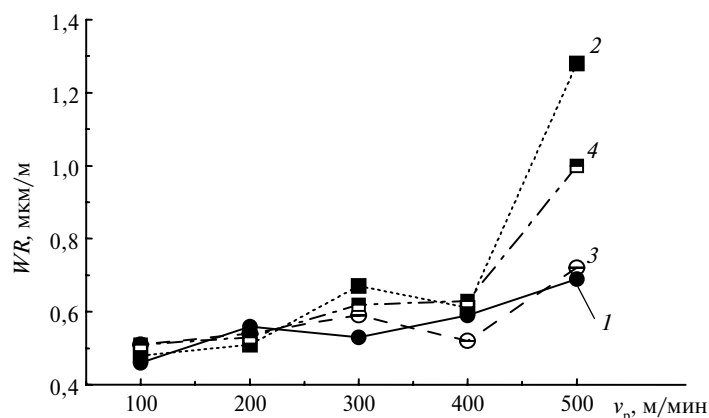


Рис. 4. Удельная величина износа при резании СР- ($f = 0,1$ (1) и $0,2$ (3) мм/об) и ЛСР- ($f = 0,1$ (2) и $0,2$ (4) мм/об) инструментами.

Анализ полученных результатов позволяет сделать некоторые выводы и замечания. Как видно из рис. 3, механизм и характер износа режущей кромки для инструментов подобен. В обоих случаях наблюдается образование лунки на передней поверхности пластины и равномерной площадки износа на зад-

ней. Скорость резания существенно влияет на величину износа инструмента и тип повреждений – интенсифицируется скругление режущей кромки в области h_{1min} , появляются сколы на передней поверхности пластины, что особенно характерно для использования стандартного держателя. Увеличение скорости резания до 500 м/мин сопровождается значительными повреждениями пластины: выкрашиванием кромки, скалыванием и расслоением по передней поверхности.

Интенсивность износа WR фактически одинакова для обоих инструментов вплоть до скорости 400 м/мин при величине подачи 0,1 мм/об (см. рис. 4). Увеличение подачи до 0,2 мм/об практически не влияет на интенсивность износа при точении инструментом с СР, но наблюдали возрастание значений WR на 10–17 % при обработке инструментом с ЛСР при данных высоких скоростях (см. рис. 4).

Таким образом, в диапазоне скоростей 100–400 м/мин при подаче $f=0,1$ мм/об износ можно считать одинаковым для обоих инструментов, взятых для сравнения. Отсюда следует, что подавление вибраций (см. таблицу) вызвано не демпфированием за счет износа, а именно свойствами ячеистой структуры, которая реализована в инструменте с ЛСР.

Для уточнения данного утверждения проведен детальный анализ особенностей вибрации инструментов. Согласно представлениям о процессе, выражения (1)–(4), увеличение демпфирующей способности системы приводит к повышению устойчивости колебаний системы. Также известно, что нестабильная работа инструмента, т. е. возникновение в процессе резания неустойчивых автоколебательных процессов, шумов, сингулярностей и т. д., может быть причиной поломок режущей кромки и снижения качества обработанной поверхности. Ниже представлен сравнительный анализ стабильности работы инструментов, основанный на результатах вейвлет-анализа спектров ускорений и “0-1” теста устойчивости траектории движения инструмента.

Вейвлет-анализ спектров ускорений

Для анализа спектров ускорений использовали непрерывное вейвлет-преобразование (ВП), которое позволяет получить двумерный массив амплитуд (коэффициентов ВП $C(a, b)$) в пространстве $(a, b) = (\text{частота}, \text{время})$. Для аппроксимации сигнала использовали вейвлет Добеши ‘ $db1$ ’ с центральной частотой $\omega_0 = 0,9961$ Гц, анализ проводили в диапазоне частот 6–100 Гц. Для выявления сингулярностей в спектрах ускорений и уровня шума использовали зависимости максимальных коэффициентов ВП $C(a, b)$ от времени. Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рис. 5.

Полученные результаты позволяют сделать следующие замечания.

1. $v_p = 100$ м/мин. Точение инструментом с ЛСР характеризуется наличием устойчивой гармоникой с частотой соответствующей вращению шпинделя. Поведение инструмента фактически не зависит от величины подачи. На вейвлет-спектрограммах стандартного инструмента наблюдается множество субгармоник и шум во всей рассматриваемой области частот (см. рис. 5, *a, б*).

2. $v_p = 300–500$ м/мин, подача $f = 0,1$ мм/об. При использовании инструмента с ЛСР с повышением скорости резания кроме основной гармоникой появляются субгармоники и наблюдается незначительное увеличение уровня шума в области низких частот. При скорости резания выше 400 м/мин наблюдается возникновение сингулярностей в окрестности частоты, что соответствует вращению шпинделя. Точение стандартным инструментом сопровождается значительным шумом и возникновением сингулярностей во всем

диапазоне частот. Средние значения C_{\max} при скорости 400 м/мин – 15 и 6 и при 500 м/мин – 17 и 5,5 для СР- и ЛСР-инструментов соответственно (см. рис. 5, в, з).

3. $v_p = 300\text{--}500$ м/мин, подача $f = 0,2$ мм/об. Увеличение подачи приводит к значительному увеличению шума, особенно в случае стандартного инструмента. Средние значения C_{\max} при 400 м/мин составляют 50 и 12 для СР- и ЛСР-инструментов соответственно (см. рис. 5, д, е).

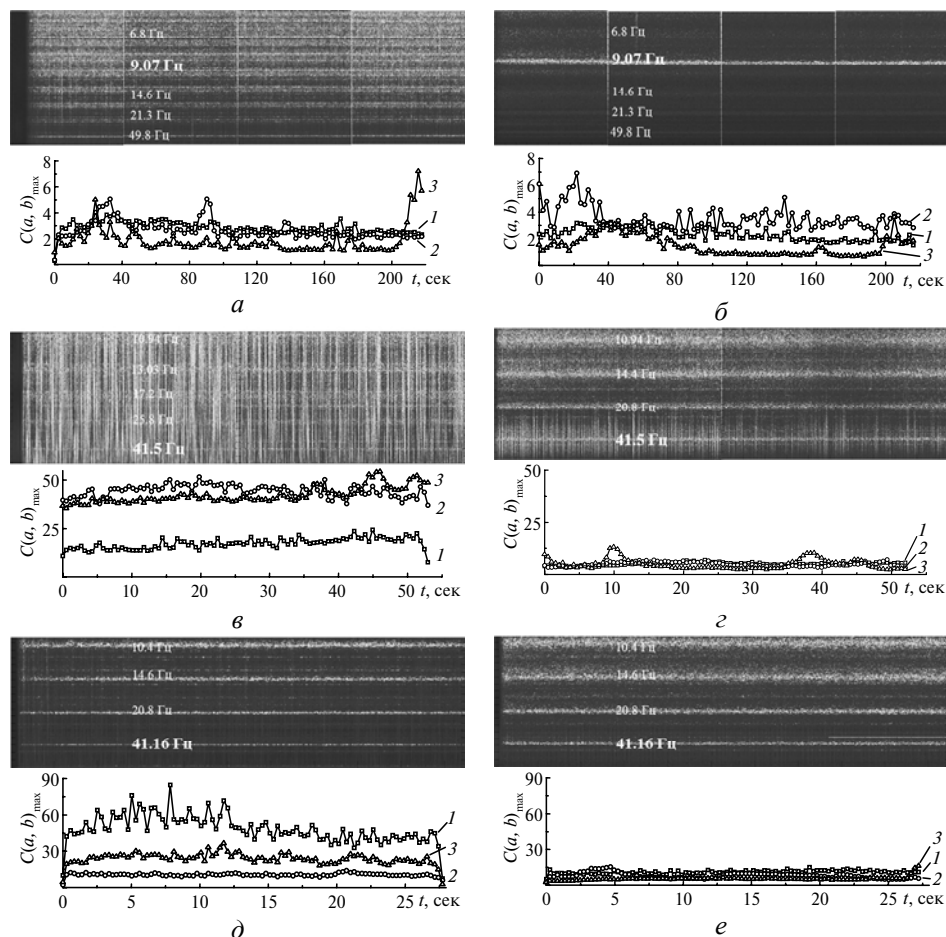


Рис. 5. Вейвлет-спектры и временные зависимости $C(a, b)_{\max}$ в направлениях резания (1), радиальном (2) и подачи (3) при различных условиях резания ($v_p = 100$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (а, б); $v_p = 500$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (в, з); $v_p = 400$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об (д, е)) СР- (а, в, д) и ЛСР- (б, з, е) инструментом.

Оценка стабильности с помощью “0-1” теста

Для оценки стабильности работы рассматриваемых инструментов в процессе точения использовали “0-1” тест. Под стабильностью, в данном случае, подразумевается некоторое регулярное движение системы, переход к хаотическому поведению обозначает потерю стабильности. В отличие от определения показателя Ляпунова, авторы [11] предлагают рассматривать отображение временного ряда на некоторую плоскость. Особенностью отображения есть то, что в случае нехаотической динамики процесса оно имеет периодический или квазипериодический характер. В свою очередь, показатель Ляпу-

нова характеризует скорость разбегания траекторий в фазовом пространстве, т. е. отклонение динамической системы от устойчивого движения по экспоненциальной зависимости. Таким образом, можно проследить общую идею между методами, но “0-1” тест намного проще для численной реализации. Результаты сравнения представлены на рис. 6 и 7. Значение “1” соответствует устойчивому движению, “0” – хаотическому.

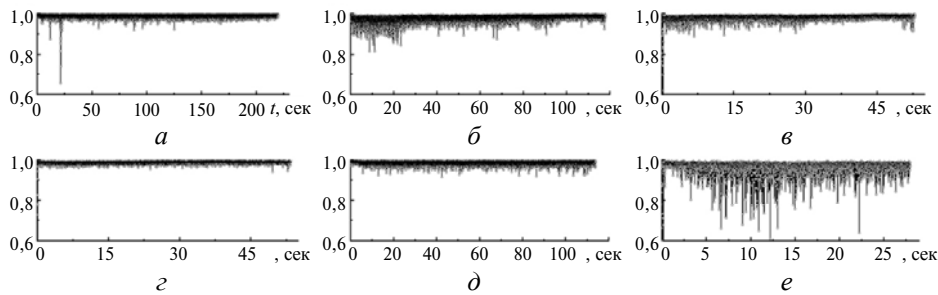


Рис. 6. Результаты “0-1” теста при точении стандартным инструментом: $v_p = 100$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (а); $v_p = 200$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (б); $v_p = 400$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (в); $v_p = 500$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (г); $v_p = 100$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об (д); $v_p = 400$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об (е).

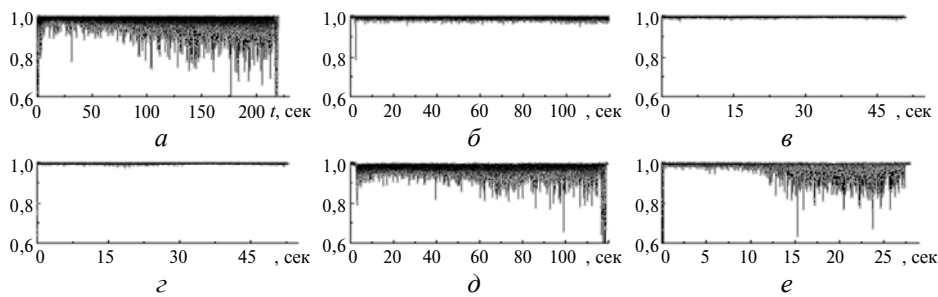


Рис. 7. Результаты “0-1” теста при точении ЛСР инструментом: $v_p = 100$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (а); $v_p = 200$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (б); $v_p = 400$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (в); $v_p = 500$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об (г); $v_p = 100$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об (д); $v_p = 400$ м/мин, $f = 0,2$ мм/об (е).

Сравнительный анализ показал, что с увеличением скорости резания при подаче $f = 0,1$ мм/об работа обоих инструментов в целом стабилизируется. Но следует отметить некоторые особенности:

- обработка ЛСР-инструментом характеризуется как неустойчивая при скорости резания $v_p < 200$ м/мин независимо от используемой подачи (см. рис. 7, а, д);

- стандартный инструмент устойчив при скоростях $v_p < 200$ м/мин независимо от подачи и теряет устойчивость в диапазоне скоростей 200–300 м/мин (см. рис. 6);

- при подаче $f = 0,2$ мм/об и скоростях 200–300 м/мин инструменты работают неустойчиво (см. рис. 6, е и 7, е). При дальнейшем увеличении скорости резания ($v_p > 300$ м/мин) работа ЛСР-инструмента стабилизируется.

В целом, инструмент с ЛСР работает стабильнее стандартного при подаче $f = 0,1$ мм/об в диапазоне скоростей $v_p = 200–500$ м/мин. Увеличение подачи до величины $f = 0,2$ мм/об приводит к потере устойчивости при точении острым инструментом. По мере увеличения износа работа инструментов стабилизируется.

СР-инструмент устойчивее при низкой скорости резания $v_p = 100$ м/мин независимо от величины подачи. Увеличение скорости резания сопровождается увеличением амплитуды вибраций, появлением шума и сингулярностей на спектрах.

ВЫВОДЫ

Экспериментальное измерение спектров сил резания и вибраций при точении суперсплава Инконель 718 показало, что обработка инструментом с ЛСР сопровождается значительным подавлением вибраций, причем амплитуда вибраций при увеличении скорости резания до 500 м/мин в 5–7 раз ниже, чем при использовании инструмента со стандартным держателем. Условия проведения эксперимента и одинаковый характер износа позволяют сделать вывод, что подавление вибраций вызвано демпфирующими свойствами ячеистой пространственной структуры, реализованной в экспериментальном резцедержателе.

Вейвлет-анализ показал, что движение ЛСР-инструмента характеризуется главной гармоникой, частота которой соответствует вращению шпинделя, и низким уровнем шума во всем диапазоне скоростей резания. При высоких скоростях резания наблюдается появление субгармоник и незначительное повышение уровня шума. Анализ спектров СР-инструмента, в отличие от предыдущего случая, показал значительное (в 3–6 раз) повышение шума и появление сингулярностей на спектрах ускорений при скоростях резания > 200 м/мин.

Согласно “0-1” теста, стандартный инструмент устойчиво работает при низкой ($v_p = 100$ м/мин) скорости резания, независимо от величины подачи. При подаче $f = 0,1$ мм/об увеличение скорости приводит к стабилизации процесса в обоих случаях, при подаче $f = 0,2$ мм/об стандартный инструмент более устойчиво работает только при низких скоростях резания, работа ЛРС-инструмента стабилизируется при высоких скоростях обработки.

Исследования были выполнены в рамках пилотного проекта совместно с “Siemens Industrial Turbomachinery AB” (Швеция) при поддержке проекта Sustainable Production Initiative (SPI).

Представлено результати порівняння стабільності роботи інструментів зі стандартним та експериментальним різцетримачами при точінні нікелевого суперсплаву інструментом із оксидної кераміки, армованої бусами карбїду кремнію. Показано, що використання експериментального різцетримача із чарунковою просторовою структурою приводить до суттєвого зменшення вібрацій у процесі обробки, а також стабілізації процесу різання у діапазоні швидкостей 200–500 м/хв. Встановлено що вказані переваги інструменту зі спеченим тримачем обумовлені демпферними властивостями розробленого різцетримача.

Ключові слова: динамічна стійкість, токарна обробка, сплав Інконель 718, знос інструменту, вейвлет-аналіз, “0-1” тест.

The paper presents the results of a comparative analysis of dynamic stability of SiC whisker reinforced alumina tools used in a conventional and prototype toolholders when turning a nickel-based superalloy Inconel 718. The use of the prototype toolholder with a cellular spatial structure is shown to significantly suppress vibrations during the machining operation and stabilize the cutting process within the cutting speed range between 200 and 500 m/min. Considering the identical nature of tool wear rate and the analytical elaborations regarding the process dynamics, the above-mentioned benefits are related to damping properties of the proposed toolholder.

Keywords: dynamic stability, turning, Inconel 718, tool wear, wavelet analysis, 0-1 test.

1. *Arunachalam R.; Mannan M. A.* Machinability of nickel-based high temperature alloys // *Machining Sci. Techn.* – 2000. – **4**, N 1. – P. 127–168.
2. *Arunachalam R. M., Mannan M. A., Spowage A. C.* Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools // *Int. J. Machine Tools & Manuf.* – 2004. – **44**. – P. 879–887.
3. *Zhou J. M., Bushlya V., Stahl J.-E.* An investigation of surface damage in the high speed turning of Inconel 718 with use of whisker reinforced ceramic tools // *J. Mater. Proc. Techn.* – 2012. – **212**. – P. 372–384.
4. *Zhou J. M., Bushlya V., Peng R. L. et al.* Effects of tool wear on subsurface deformation of nickel-based superalloy // 1st CIRP Conf. on Surface Integrity (CSI): *Procedia Engineering.* – 2011. – **19**. – P. 407–413.
5. *Nakao W., Ono M., Lee S.-K., Takahashi K., Ando K.* Critical crack-healing condition for SiC whisker reinforced alumina under stress // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2005. – **25**. – P. 3649–3655.
6. *Kumar A. S., Jiang W., Brown W. D., Malshe A. P.* Wear behaviour of alumina-based ceramic cutting tools on machining steels // *Tribology International.* – 2006. – **39**. – P. 191–197.
7. *Bushlya V., Zhou J., Ståhl J. E.* Effect of cutting conditions on machinability of superalloy Inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools // *Manufacturing Systems. 45th CIRP Conf. 2012: Procedia CIRP.* – 2012. – **3**. – P. 370–375.
8. *Parka G., Bement M. T., Hartman D. A. et al.* The use of active materials for machining processes: a review // *Int. J. Mach. Tools Manufact.* – 2007. – **47**. – P. 2189–2206.
9. *Wiercigroch M., Krivtsov A. M.* Frictional chatter in orthogonal metal cutting // *Philosoph. Transact. Royal Soc. A.* – 2012. – **359**. – P. 713–738.
10. *Clancy B. E., Shin, Y. C.* A comprehensive chatter prediction model for face turning operation including tool wear effect // *Int. J. Mach. Tools Manufact.* – 2002. – **42**. – P. 1035–1044.
11. *Gotwald G. A., Melbourne I.* On the implementation of the 0-1 test for chaos // *SIAM J. Appl. Dynam. Syst.* – 2009. – **8**. – P. 129–145.

Ун-т Лунда
(Lund University)
Siemens Turbomachinery AB

Поступила 19.08.13