

УДК 621.01:532.3

В. И. Бутенко, д-р техн. наук, проф.
Донской государственный технический университет
E-mail: butenkowiktor@yandex.ru

ДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Предложен критерий оценки состояния технологической системы при комбинированной обработке деталей машин, позволяющий определять области устойчивости системы и находить точки её равновесия. Показано, для идентификации устойчивости динамических процессов, происходящих в технологической системе отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей с одновременным формированием на них функциональных слоёв или покрытий целесообразно использовать $S(t)$ -критерий, зависящий от амплитуды на значимых частотах спектра виброакустического сигнала и её математического ожидания.

Ключевые слова: поверхность, деталь, система, обработка, сигнал, слой, покрытие, критерий, устойчивость.

V. I. Butenko

DYNAMIC CRITERIA FOR THE ASSESSMENT OF THE CONDITION OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM IN THE COMBINED TREATMENT OF MACHINE DETAILS

A criterion for assessing the state of the technological system in the combined processing of machine parts is proposed, which allows determining the system's stability region and finding its equilibrium points. It is shown that to identify the stability of dynamic processes occurring in the technological system of finishing and hardening processing of parts with simultaneous formation of functional layers or coatings on them, it is advisable to use the $S(t)$ criterion depending on the amplitude at significant frequencies of the vibroacoustic spectrum. signal and its mathematical expectation.

Keywords: surface, detail, system, processing, signal, layer, coating, criterion, stability.

1. Введение

В современном машиностроительном производстве нашли широкое применение комбинированные методы обработки деталей с созданием на их поверхностях функциональных слоёв и покрытий [1 – 5]. В состав технологических систем для таких комбинированных методов обработки деталей, как правило, входит механическое оборудование, предназначенное, например, для отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) материала поверхностного слоя. В связи с этим возникает необходимость проведения интегральной оценки всей технологической системы комбинированной обработки деталей, учитывающей не только механические воздействия на материал поверхностного слоя, но и особенности создания на поверхностях деталей функциональных слоёв и покрытий по тем или иным технологиям.

2. Основное содержание и результаты работы

Для выявления эффективного динамического критерия оценки состояния технологической системы при комбинированной обработке деталей машин с созданием на их поверхностях функциональных слоёв и покрытий была принята технологическая система типа «станок – среда – инструмент – обрабатываемая деталь». Согласно данным, приведённым в работах [6, 7], важнейшим оценочным и информационным показателем качества созданных по той или иной технологии на поверхностях деталей функциональных слоёв и покрытий может быть признан интегральный $S(t)$ -критерий,

характеризующий соотношение амплитуд спектра виброакустического сигнала и учитывающий перетекание энергии колебаний из низкочастотной области в высокочастотную при изменении состояния технологической системы [8]. При этом считается, что эффект перетекания возникает из-за рассеивания энергии, идущей на поддержание колебательного процесса, и связан с диссипативными свойствами динамической системы [9]. Тогда, применяя $S(t)$ -критерий, можно количественно оценить этот процесс по выражению:

$$S(t) = \frac{\sum_{j=1}^m A_j}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (1)$$

где A_j – амплитуды на значимых частотах спектра; m – число значимых частот спектра; A_i – все возможные амплитуды спектра; n – число учтённых амплитуд спектра; $n \geq m$.

Очевидно, что оптимальный режим функционирования любой динамической системы достигается при $S(t) \rightarrow \min$.

Значимость амплитуды A_j обычно определяется по следующему условию:

$$A_j \geq 0,2 A_{max},$$

где A_{max} – максимальная величина амплитуды спектра виброакустического сигнала.

Если спектр является более или менее «ровным», т.е. в нём отсутствует ярко выраженный максимум A_{max} , то $S(t)$ -критерий принимает большие значения, сигнализируя об ухудшении динамического состояния используемой технологической системы, хотя такой вид спектра может характеризовать стабильную работу отдельных её элементов (например, станка, входящего в технологическую систему для выполнения ОУО поверхностного слоя детали) [10, 11]. В связи с этим целесообразным является использование другого метода реализации спектра, учитывающего его информативную часть и шумы. Таким методом является непараметрический метод, носящий название в разведочном (предварительном) анализе «ящик с усами» [10]. Барьер δ , при выходе за который амплитуды характеризуют неслучайное начало в распределении данных спектра колебаний упруго-диссипативной системы, определяется по выражениям

$$\Delta C = C_2 - C_1; \quad \delta = C_2 + 1,5\Delta C, \quad (2)$$

где C_1 – медиана упорядоченного спектра от первого значения до медианы; C_2 – медиана спектра от медианы упорядоченного спектра до последнего значения; ΔC – межквартильный размах (разность между нижней и верхней квартилями).

Следует отметить, что стратегии определения значимых амплитуд виброакустического сигнала при идентификации качества динамических процессов при механической обработке материалов в автоматизированном режиме рассмотрены в работе [6].

Известно [4, 10], что процессы, имеющие место при формировании на поверхностях деталей функциональных слоёв и покрытий, носят случайный характер и имеют различную интенсивность, поэтому спектр виброакустического сигнала у них также изменяется случайным образом. На рис. 1 приведены примеры

вибраакустического сигнала, полученные для принятой технологической системы комбинированной обработки деталей с созданием на их поверхностях функциональных слоёв и покрытий при использовании автономного микропроцессорного виброанализатора AU 014. В качестве функционального слоя на поверхность детали, подвергающейся ОУО, электролитическим путём наносился медный слой толщиной 10 мкм. Анализ приведённых осциллограмм свидетельствует о том, что в момент окончательного формирования на поверхности детали медного слоя происходит высокочастотный всплеск, приводящий к нарушению динамической устойчивости используемой технологической системы. Этот фактор необходимо учитывать при разработке технологий создания на поверхностях деталей эффективных слоёв и покрытий. Именно поэтому расчёт числителя и знаменателя $S(t)$ -критерия по формуле (1) целесообразно вести с использованием таких типовых характеристик, как дисперсия амплитуды D_S и её математическое ожидание M_S , используя следующие математические модели:

$$D_S = \sum_{j=1}^m (A_j - M_S)^2, \quad \text{где } M_S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i. \quad (3)$$

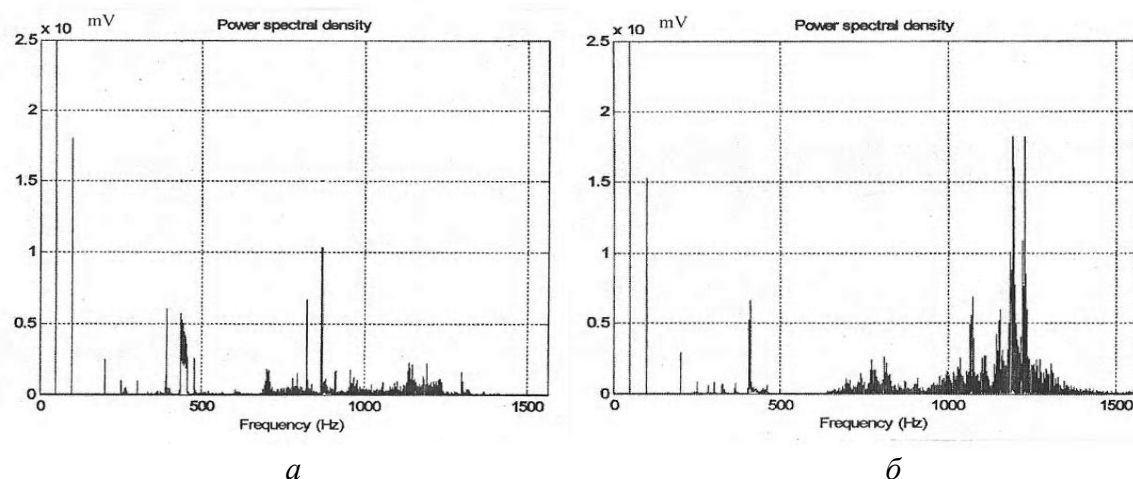


Рисунок 1. Осциллограммы сигналов виброакустической эмиссии: *a* – до появления высокочастотного всплеска; *б* – в момент окончательного формирования на поверхности детали медного слоя заданной толщины

Для выявления наиболее эффективного и чувствительного к изменениям в динамике процесса формирования поверхностного слоя детали, а также определения стратегии разделения спектра виброакустического сигнала была проведена количественная оценка наборов имитационных сигналов, имеющих различный амплитудно-частотный состав. В результате было установлено, что наиболее реальным при идентификации качества динамических процессов при комбинированной обработке поверхностей деталей, включающей ОУО и формирование на их функциональных слоёв или покрытий в автоматическом режиме является использование $S(t)$ -критерия вида

$$S(t)' = \frac{\sum_{j=1}^m (A_j - M_s)^2}{\sum_{i=1}^n A_i}. \quad (4)$$

Следует отметить, что формула (4) может быть использована только в тех случаях, когда стратегия разделения спектра возможна до барьера, определяемого зависимостями (1). Тем не менее, $S(t)'$ -критерий может быть использован для сравнительной оценки динамической устойчивости любой технологической системы, в которой осуществляется ОУО и создание на поверхностях деталей функциональных слоёв или покрытий. При этом для качественной оценки такой динамической системы удобно определять $S(t)'$ -критерий отдельно как по высокочастотному всплеску $S(t)^A$, так и по продолжительности изменения частоты $S(t)^t$, что особенно важно при технологической подготовке производственного процесса.

По значениям $S(t)^A$ и $S(t)^t$ возможно построение фазовых траекторий состояния всей технологической системы, анализ её устойчивости и нахождение точки равновесия процесса комбинированной обработки детали с созданием на её поверхностях функциональных слоёв и покрытий. Так, например, с помощью прямого цифрового моделирования в пакете прикладных программ Simulink [4, 10] были получены и проанализированы притягивающие многообразия, которые формируются в окрестности точки равновесия технологической системы «станок – среда – инструмент – обрабатываемая деталь». На рис. 2 приведён пример таких областей устойчивости, анализ которых показывает, что области, находящиеся выше приведённых кривых, соответствуют неустойчивому поведению технологической системы в вариациях относительно точки равновесия.

Используя современные методы моделирования различных процессов и технологических систем, были исследованы области притяжения точек равновесия, при кото-

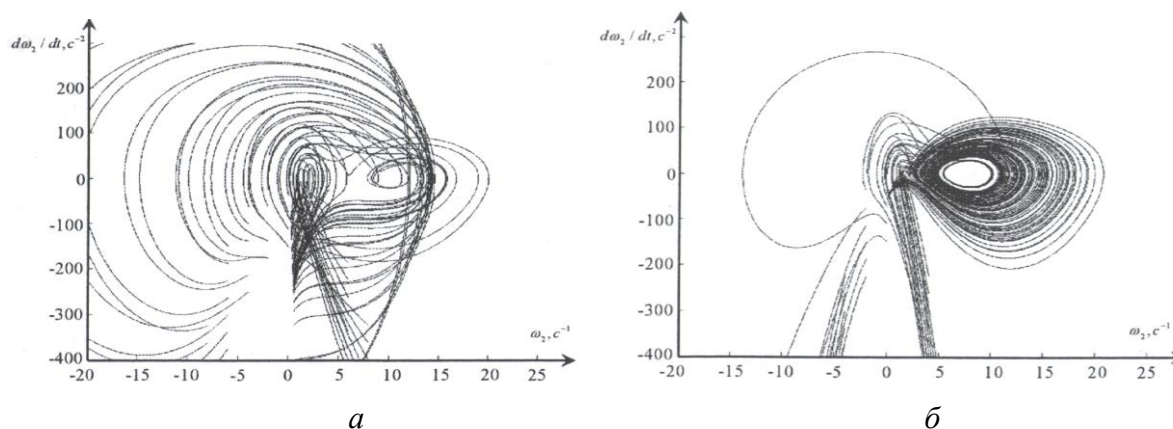


Рисунок 2. Графики фазовых траекторий, характеризующие реакцию технологической системы на условия ОУО деталей: *a* – удалённая от точки равновесия; *б* – близкая к точки равновесия

рых обеспечивается устойчивая ОУО поверхностей деталей машин. На рис. 3 приведены примеры результатов такого моделирования, представленные в виде

графиков фазовых траекторий для разных условий и режимов осуществления ОУО деталей с формированием на их поверхностях функциональных слоёв и покрытий. Установлено, что область притяжения асимптотически устойчивой точки равновесия при ОУО отделяется от всего фазового пространства сепаратрисой, которая выделена на рис. 3, б.

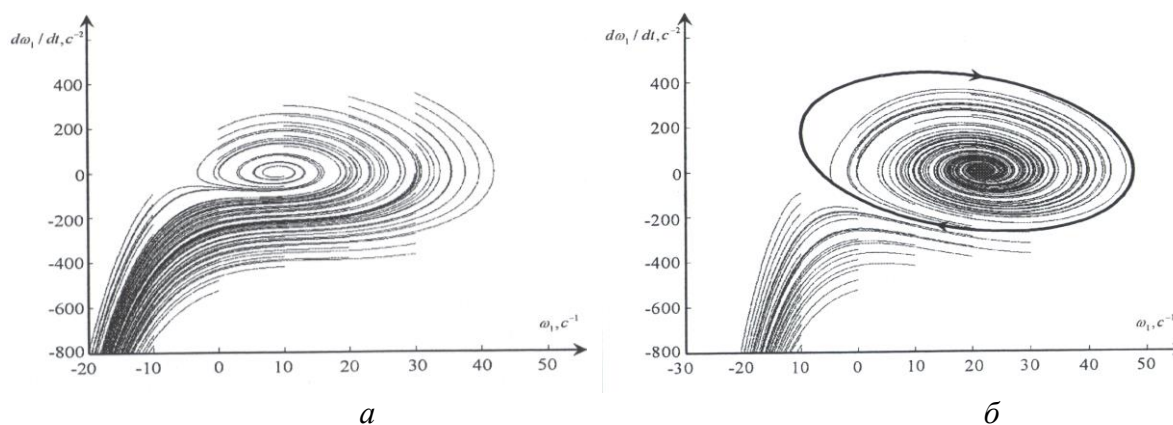


Рисунок 3. Графики фазовых траекторий при поиске точки равновесия процесса ОУО: *а* – область неустойчивости; *б* – область притяжения асимптотически устойчивой точки равновесия

Следовательно, можно констатировать, что динамическая система, которую представляет технологическая система комбинированной обработки деталей с созданием на их поверхностях функциональных слоёв и покрытий имеет единственную точку равновесия, являющуюся точкой в подвижной системе координат, движение которой определяется траекториями всех подвижных элементов рассматриваемой технологической системы. За счёт динамической связи ОУО поверхностного слоя деталей с процессом создания на нём функциональных слоёв или покрытий точка равновесия может быть асимптотически устойчивой или неустойчивой. При потере устойчивости в системе формируются стационарные многообразия, характеризующие колебания используемого упрочняющего инструмента относительно обрабатываемой поверхности детали. В этом случае в системе формируются орбитально-асимптотически устойчивые предельные циклы – автоколебания [9, 11], учёт которых позволяет определить направления по выбору технологических режимов и параметров упрочняющего инструмента, обеспечивающие требуемый запас устойчивости технологической системы и качество формируемого на поверхности детали функционального слоя или покрытия.

Выполнены комплексные исследования по установлению зависимости показателей качества поверхностного слоя детали, подвергаемой комбинированной обработке, от $S(t)$ -критерия и устойчивости технологической системы. Исследованиям подвергались цилиндрические бесступенчатые валики из стали 12ХН3А диаметром 24 мм и длиной 200 мм, прошедшие предварительную чистовую токарную обработку. Комбинированная обработка детали включала обкатку поверхности роликом на токарном станке мод. 1А620 при одновременном нанесении на неё медного слоя толщиной $h_c = (20 - 40)$ мкм по технологии, описанной в работах [4, 5]. В качестве эксплуатационного показателя качества получаемого после комбинированной обработки детали определялось напряжение сдвига τ_{cd} при давлении на обработанную

поверхность контртела $p = 1,5$ МПа с использованием установки, описанной в работе [12].

В табл. 1 приведены обобщённые результаты выполненных исследований, полученные как среднеарифметические по данным десяти последовательно выполненным экспериментам, из анализа которых следует, что устойчивая технологическая система обеспечивает незначительное изменение показателей качества поверхностного слоя детали в широком диапазоне изменения величины $S(t)$ -критерия и существенно снижает их разброс по параметрам h_c , Ra , H_V и $\tau_{сд}$ (табл. 2).

Таблица 1. – Результаты комплексного исследования показателей качества поверхностного слоя деталей при их комбинированной обработке в зависимости от $S(t)$ -критерия и устойчивости технологической системы

Состояние технологической системы	Величина $S(t)$ -критерия	Показатели качества поверхностного слоя детали				
		h_c , мкм	Ra , мкм	H_V , МПа	K_ρ	$\tau_{сд}$, МПа
Неустойчивая	до 1,50	22,5	0,92	285	118	410
	1,51 – 1,80	25,5	1,10	270	110	390
	1,81 – 2,10	29,0	1,22	260	105	380
	2,11 – 2,40	32,5	1,35	250	100	370
	свыше 2,40	36,5	1,48	230	90	360
Устойчивая	до 1,50	24,5	0,95	290	120	380
	1,51 – 1,80	25,0	1,02	285	112	375
	1,81 – 2,10	25,5	1,08	280	110	370
	2,11 – 2,40	26,0	1,12	275	105	365
	свыше 2,40	27,0	1,15	265	100	360

3. Заключение

Таким образом, использование при комбинированной обработке деталей динамического $S(t)$ -критерий позволяет оперативно корректировать состав технологических систем и режимов комбинированной обработки. Это целесообразно проводить на стадии подготовки процесса комбинированной обработки путём испытания принятой технологической системы на значимость $S(t)$ -критерия у опытной партии деталей, обеспечивая требуемые показатели качества поверхностного слоя.

Таблица 2. – Разброс показателей качества поверхностного слоя деталей при их комбинированной обработке в зависимости от $S(t)$ -критерия и устойчивости технологической системы

Состояние технологической системы	Величина $S(t)$ -критерия	Показатели качества поверхностного слоя детали				
		Δh_c , мкм	ΔRa , мкм	ΔH_V , МПа	ΔK_ρ	$\Delta \tau_{сд}$, МПа
Неустойчивая	до 1,50	2,8	0,09	50	35	95
	1,51 – 1,80	3,0	0,11	60	40	80
	1,81 – 2,10	3,3	0,14	70	45	65
	2,11 – 2,40	3,7	0,17	85	50	55
	свыше 2,40	4,0	0,20	90	60	50
Устойчивая	до 1,50	2,0	0,8	25	25	60

	1,51 – 1,80	2,1	0,9	30	30	55
	1,81 – 2,10	2,3	0,10	35	35	50
	2,11 – 2,40	2,5	0,11	40	35	45
	свыше 2,40	2,8	0,13	40	35	40

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бабичев, А. П. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А. П. Бабичев, В. В. Иванов, С. Н. Худoley [и др.]. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2012. – 204 с.
2. Иванов, В. В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий / В. В. Иванов. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 142 с.
3. Болдырев, А. И. Электрохимикомеханическая обработка / А. И. Болдырев. – Воронеж: Издательство-полиграф. Центр ВГТУ, 2012. – 243 с.
4. Бутенко, В. И. Модифицированные и многокомпонентные функциональные слои на поверхностях деталей машин / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. – 235 с.
5. Бабичев, А. П. Процессы формирования вибрационного покрытия в условиях комбинированного химико-механического воздействия / А. П. Бабичев, В. В. Иванов // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сборник трудов Международной научно-технической конференции – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – С. 118 – 120. Режим доступа: <http://www.ntb.donstu.ru/content/201871>.
6. Бровкова, М. Б. Разработка системы критериальных оценок состояния сложного технологического оборудования / М. Б. Бровкова и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 51. – С. 89 – 95.
7. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Терра», 2006. – 376 с.
8. Заковоротный, В. Л. Виброакустическая диагностика трибосопряжений / В. Л. Заковоротный, Н. С. Семёнова // Вестник ДГТУ. – 2005. – Т. 5. – № 1(23). – С. 40 – 49.
9. Заковоротный, В. Л. Динамическая диагностика процесса обработки методами поверхностного пластического деформирования / В. Л. Заковоротный, В. С. Минаков, М. М. Ханукаев // Вестник Донского государственного технического университета. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2012. – № 1(62). – С. 38 – 45.
10. Бутенко, В. И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2017. – 481 с.
11. Заковоротный, В. Л. Устойчивость процесса алмазного выглаживания / В. Л. Заковоротный, М. М. Ханукаев // Вестник Донского государственного технического университета. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2014. № 1(75). – С. 21 – 26.
12. Бутенко, В. И. Структура и потенциал трибоконтakta поликристаллических материалов / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2018. – 160 с.

Поступила в редколлегию 16.04.2019 г.