



Многофакторное влияние на шероховатость обработанной поверхности

© П.А. Саблин, В.С. Щетинин

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме: Цель работы – сформировать новый подход к обеспечению качества обработанной поверхности на основе применения многофакторной модели. Предлагаемая модель способна учесть практически все параметры процесса механообработки. К данным основным параметрам относятся режимы резания, динамическая устойчивость процесса резания, тепловые эффекты в зоне резания. Разработка многофакторной модели основывалась на результатах анализа литературных источников, данных экспериментальных исследований, проведенных с использованием методов силового анализа процесса резания, цветовой пирометрии. Полученные данные были обобщены в единую многофакторную модель. Проведены анализ литературных источников, обобщение экспериментальных данных и результатов выполненных исследований по обеспечению качества обработанной поверхности при управлении каким-либо одним входным параметром процесса механообработки. Показано, что качество обработки (шероховатость) достигается посредством применения различных параметров обработки. К ним относятся: рациональные режимы резания, изменение геометрии режущего инструмента, снижение относительных пространственных динамических колебаний инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки, использование методов, воздействующих на физико-механические свойства обрабатываемых материалов. Установлено, что в качестве входного параметра могут выступать динамическая устойчивость процесса, режимы резания или процесс стружкообразования. Показано, что предложенная схема многофакторного влияния параметров обработки на выходной параметр – шероховатость поверхности – применима для любого вида обработки материалов. Созданная модель учитывает все входные параметры механической обработки и нацелена на управление качеством обработанной поверхности, исходя из требуемых эксплуатационных характеристик детали и изделия. На основе предложенной многофакторной схемы планируется создание адаптивной системы, которая будет способна управлять процессом механической обработки на базе многоцелевого станка с числовым программным управлением.

Ключевые слова: шероховатость, стружкообразование, динамическая устойчивость

Для цитирования: Саблин П.А., Щетинин В.С. Многофакторное влияние на шероховатость обработанной поверхности. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 161–171. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-161-171>

Multi-factor influence on the roughness of the finished surface

Pavel A. Sablin, Vladimir S. Shchetinin

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract: The aim of this work is to develop a novel approach for ensuring the quality of the finished surface based on a multi-factor model. The proposed model can take into account most of the machining process parameters. The main parameters include cutting conditions, dynamic stability of the cutting process, thermal effects in the cutting area. The development of a multi-factor model was based on a literature review and experimental data obtained from the cutting force analysis and colour pyrometry. The data obtained were summarised into a unified multi-factor model. We analysed the key literature sources and summarised the experimental data and findings to assure finished surface quality when controlling one of the input parameters of the machining process. It was shown that the surface quality (roughness) can be achieved by applying different machining parameters. They include the rational cutting conditions, a change in the geometry of a cutting tool, reducing the relative spacial dynamic vibrations of the tool relative to the working surface of the raw part, using the methods influencing the physical and mechanical properties of the processed materials. It was established that the process dynamic stability, the cutting conditions or the chip formation process can be used as an input parameter. The proposed scheme of multi-factor influence of processing parameters on the output parameter - the surface roughness - applies to any materials under processing. The created model takes into account all input parameters of mechanical processing. It aims at the quality management of the finished surface based on the required performance

characteristics of the items. Based on the proposed multi-factor scheme, we plan to create an adaptive system capable of controlling the mechanical processing based on a computer numeric control machining centre.

Keywords: roughness, chip formation, dynamic stability

For citation: Sablin PA, Shchetinin VS. Multi-factor influence on the roughness of the finished surface. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):161–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-161-171>

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы управления шероховатостью механической обработки. Поскольку под качеством поверхности детали понимают состояние ее поверхностного слоя, а это включает в себя как высоту микронеровностей (шероховатость), так и физико-механическое состояние поверхностного слоя, то авторы в данной работе предлагают использовать термин «качество» как синоним понятия «шероховатость» и ограничиться лишь оценкой геометрических характеристик поверхности.

В современном автоматизированном производстве, где количество безлюдных технологий неизменно растет, роль контроля за каким-либо процессом или результатом повышается в разы. В этой связи вопрос обеспечения качества обработанной поверхности в условиях автоматизированного производства, которым занимаются ведущие научные школы страны и мира, остается актуальным и сегодня.

Качество обработки поверхности является как составным параметром точности обработки, так и самостоятельным параметром. Например, обеспечив высокую точность линейного размера, высокое качество обработанной поверхности обеспечивается автоматически (по умолчанию). Но в то же время данное правило никак не действует в «обратном направлении», то есть, обеспечив высокое качество обработанной поверхности, нельзя однозначно говорить о том, что мы обеспечили высокую точность.

Одними из первых, кто начал изучать процессы, происходящие в зоне резания, стали русские ученые И.А. Тиме и Я.Г. Усачев. Механизмы пластической деформации при резании в своих работах изучали как зарубежные, так и отечественные ученые: А.М. Розенберг, М.И. Клушин, Н.Н. Зорев и др.

Актуальность вопросов, связанных с по-

вышением надежности процессов механообработки, приводит к решению целого ряда задач, таких как:

- управление устойчивостью процесса обработки;
- повышение эффективности стружкодробления;
- повышение работоспособности режущего инструмента;
- повышение точности и качества изготовленных деталей.

Поэтому эффективность механической обработки в частных случаях зависит не только от постоянной модернизации совершенствования динамики станочного оборудования, но и от глубины проработки явлений, происходящих при резании. В этой связи управлять выходными параметрами механообработки становится невозможно без углубленного изучения физических процессов при резании и, прежде всего, механизма деформации срезаемого слоя, устойчивости упругой системы станочного оборудования, закономерностей формообразования, а также изнашивания и разрушения режущего инструмента.

Система резания является открытой термодинамически неустойчивой системой, через которую проходит поток механической и тепловой энергии, вызывающий фазовые и структурные превращения в приконтактных слоях и формирование вторичных (диссипативных) структур. Устойчивость и оптимальное функционирование системы резания будут определяться интенсивностью протекания этих процессов, взаимодействием с упругой системой станка и внешней средой.

Все перечисленные выше факторы, безусловно, влияют на качество обработанной поверхности. Большое количество научных работ в области резания материалов посвящено управлению тем или иным параметром процесса механообработки с целью повыше-



ния качества, либо производительности обработки. Также широкий спектр работ посвящен управлению сразу же несколькими параметрами процесса резания.

Не умаляя заслуг ведущих научных школ в области обработки материалов резанием, авторы предлагают рассмотреть многофакторный подход к управлению качеством обработанной поверхности через воздействие на широкий спектр параметров процесса механической обработки.

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Если обеспечение точности обработки достигается за счет жесткости системы «станок–приспособление–инструмент–заготовка» [1], точных узлов станка и приспособлений, систем точного позиционирования и относится к области станкостроения и технологии машиностроения, то качество обработки хотя и за-

висит от точности, но относится к области процесса отделения от обрабатываемого материала стружки с помощью режущего клина и получения обработанной поверхности с заданными параметрами шероховатости.

Так, например, в своих работах [2–4] М.Р. Гимадеев впервые получил зависимость качества обработки, а именно: параметров шероховатости (R_a , R_z , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v , R_{sm} , R_{ku} , ... R_{sk}) не только от режимов обработки, но и от способов фрезерования. Благодаря тщательному подбору способа обработки, траектории движения режущего инструмента, формы режущего инструмента и стратегии обработки, есть возможность получать заданный параметр шероховатости.

В своей работе [3] автор впервые вывел корреляцию между параметрами шероховатости, согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014¹, для определенных способов механической обработки (рис. 1).

	R_a	R_z	R_q	R_p	R_c	R_t	R_v	R_{ku}	R_{sk}	R_{sm}
R_a	1,00	0,91	0,99	0,94	0,91	0,86	0,74	-0,28	-0,13	0,18
R_z	0,91	1,00	0,92	0,93	0,84	0,98	0,92	-0,14	-0,30	-0,03
R_q	0,99	0,92	1,00	0,95	0,91	0,88	0,76	-0,24	-0,15	0,15
R_p	0,94	0,93	0,95	1,00	0,86	0,89	0,72	0,01	-0,03	0,06
R_c	0,91	0,84	0,91	0,86	1,00	0,78	0,69	-0,20	-0,04	0,34
R_t	0,86	0,98	0,88	0,89	0,78	1,00	0,93	-0,11	-0,29	-0,10
R_v	0,74	0,92	0,76	0,72	0,69	0,93	1,00	-0,28	-0,53	-0,13
R_{ku}	-0,28	-0,14	-0,24	0,01	-0,20	-0,11	-0,28	1,00	0,58	-0,24
R_{sk}	-0,13	-0,30	-0,15	-0,03	-0,04	-0,29	-0,53	0,58	1,00	0,22
R_{sm}	0,18	-0,03	0,15	0,06	0,34	-0,10	-0,13	-0,24	0,22	1,00

Рис. 1. Корреляционная зависимость параметров шероховатости при фрезеровании концевой сферической фрезой

Fig. 1. Correlation dependence of roughness parameters when milling with a ball-nose end mill

¹ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Введ. 01.01.2016. М.: Стандартиформ, 2019.

Из рис. 1 авторы [3] выявили корреляционную зависимость параметров шероховатости при фрезеровании сферической концевой фрезой:

$$R_z = 0,391 + 4,022 \cdot R_a;$$

$$R_t = 0,284 + 4,531 \cdot R_a;$$

$$R_v = -0,531 + 0,403 \cdot R_t;$$

$$R_g = 0,039 + 1,145 \cdot R_a;$$

$$R_p = 0,499 + 2,274 \cdot R_a;$$

$$R_c = 0,165 + 3,630 \cdot R_a.$$

Но качество обработанной поверхности (то есть высота микронеровностей) при этом так и остается величиной, которая зависит от режимов обработки, геометрии режущего инструмента, температурной картины в зоне резания и многого другого.

СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ И ТЕМПЕРАТУРА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

При увеличении скорости резания при обработке различных материалов [5] происходит последовательное изменение характера стружкообразования от элементной к сливной, а далее к суставчатой (сегментной). Как известно, сегментная стружка образуется либо при незначительном превышении рекомендуемых режимов резания, а именно – скорости, либо при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные стали и титановые сплавы².

В своей работе М.И. Клушин [6] впервые связал механизм сегментного стружкообразования с температурными разупрочнениями, т.е. с адиабатическими процессами в зоне резания.

Также на характер стружкообразования оказывают большое влияние области локализованного сдвига, как в самой зоне резания, так и в точке контакта стружки с перед-

ней поверхностью инструмента и в точке контакта задней поверхности инструмента с заготовкой [7].

Пластическая деформация, которая локализована в зоне сдвига, сопровождается выделением большого количества тепла, а также структурными и фазовыми превращениями. В этой связи температура стружки в момент отделения ее от обрабатываемого материала может достигать температуры плавления металла, особенно выражено это происходит при высокоскоростной обработке.

Анализ температурных картин, которые представлены на рис. 2 б и 3 б, показывает, что при высокоскоростном фрезеровании закаленной стали 45 температура стружки достигает 813°C, а средняя температура на поверхности стружки может достигать 678°C; при обработке титанового сплава ВТ3 максимальная температура стружки составляет 1041°C, а средняя – 917°C [8].

Для повышения эффективности механической обработки, исследования тепловых процессов в зоне резания должны установить взаимосвязь температуры стружки с шероховатостью поверхности.

На рис. 4–7 показаны графики зависимости силы резания, шероховатости поверхности и температуры стружки для стали 45 и титанового сплава ВТ3.

В связи с этим следует сделать промежуточный вывод, что при детальном исследовании процесса высокоскоростной обработки необходимо использовать сразу несколько методов диагностики [9].

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МАТЕРИАЛ

В работе [10] авторы исследуют шероховатость деталей из полимерных материалов, предварительно обработанных поверхностно-активными веществами (ПАВ). В табл. 1 показано значительное снижение шероховатости поверхности детали, которую подвер-

²Саблин П.А. Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки при фрезеровании: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Комсомольск-на-Амуре, 2008. 141 с.



гали предварительной обработке поверхностно-активными веществами.

Аналогичные исследования проводились в работе [11], в которой также как и в работе [10] наблюдается снижение шероховатости обработанной поверхности. Только в данном [11] случае снижение шероховатости происходит за счет предварительной виброобработки связующего. На стеклопластик Этал Т 210-Т11-ГВС9 воздействовали следующими параметрами: колебания частотой 100 Гц с

амплитудой 60 мкм в течение 5 мин.

В табл. 2 отображены результаты снижения шероховатости поверхности при обработке стеклопластика.

Существуют также работы, направленные на повышение качества обработанной поверхности при различном физическом воздействии на металлическую заготовку (лазерное воздействие, ультразвуковое воздействие и т.д.).



Рис. 2. Процесс высокоскоростной обработки титанового сплава ВТ3 (а) и тепловой снимок (б).
Режимы резания: $V = 370$ м/мин, $S = 0,05$ мм/зуб, $t = 1,1$ мм
Fig. 2. High-speed processing of VT3 titanium alloy (a) and a heat snapshot (b).
Cutting modes: $V = 370$ m/min, $S = 0.05$ mm/tooth, $t = 1.1$ mm



Рис. 3. Процесс высокоскоростной обработки закаленной стали 45 твердостью 52 HRC (а) и тепловой снимок (б).
Режимы резания: $V = 448$ м/мин, $S = 0,05$ мм/зуб, $t = 1,2$ мм
Fig. 3. High-speed processing of 45 hardened steel with the hardness of 52 HRC (a) and a heat snapshot (b).
Cutting modes: $V = 448$ m/min, $S = 0.05$ mm/tooth, $t = 1.2$ mm

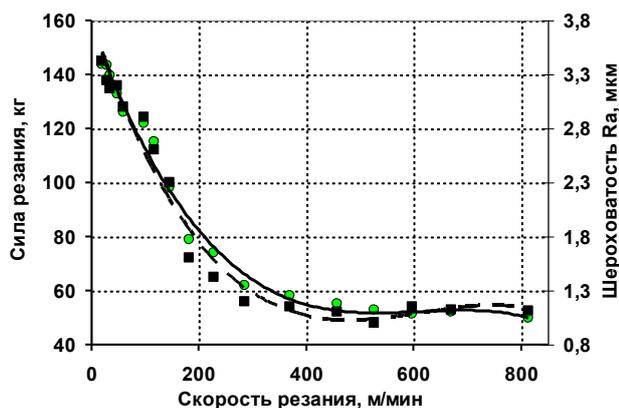


Рис. 4. Корреляционная зависимость силы резания (сплошная линия) и шероховатости поверхности (пунктирная линия) от скорости резания при обработке закаленной стали 45 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1,2$ мм)

Fig. 4. Correlation dependence of the cutting force (solid line) and the surface roughness (dotted line) on the cutting speed when processing hardened steel 45 ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1.2$ mm)

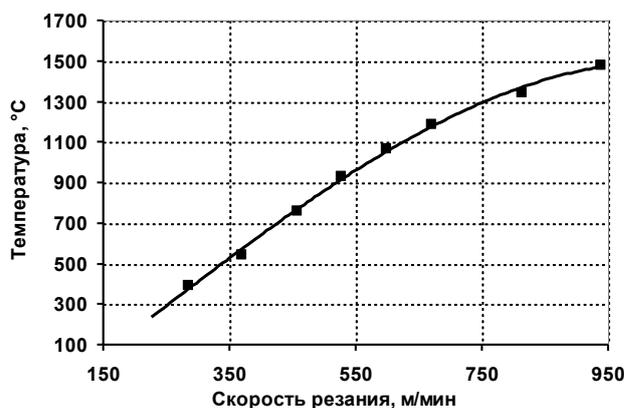


Рис. 5. Зависимость средней температуры поверхности стружки от скорости резания при обработке закаленной стали 45 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1,2$ мм)

Fig. 5 Average temperature of chip surface vs cutting speed when processing hardened steel 45 ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1.2$ mm)

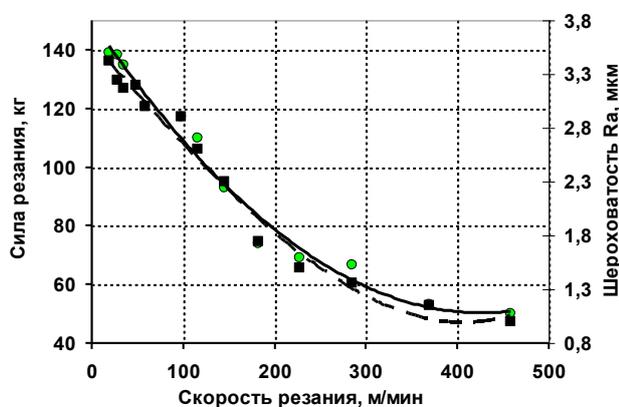


Рис. 6. Корреляционная зависимость силы резания (сплошная линия) и шероховатости поверхности (пунктирная линия) от скорости резания при обработке титанового сплава VT3 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1$ мм)

Fig. 6. Correlation dependence of the cutting force (solid line) and surface roughness (dotted line) on the cutting speed when processing VT3 titanium alloy ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1$ mm)

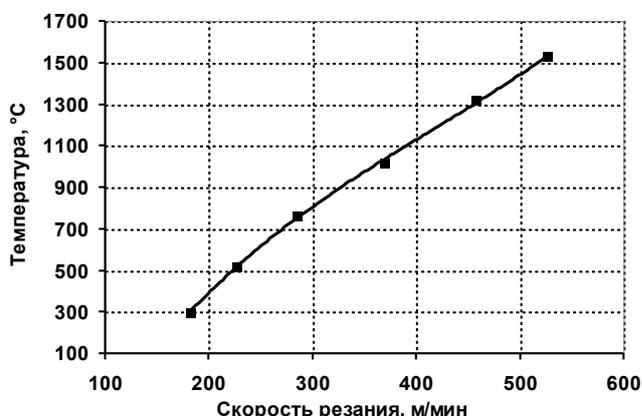


Рис. 7. Зависимость средней температуры поверхности стружки от скорости резания при обработке титанового сплава VT3 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1$ мм)

Fig. 7. Average temperature of chip surface vs cutting speed when processing VT3 titanium alloy ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1$ mm)

ГЕОМЕТРИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ДИНАМИКА ПРОЦЕССА

Очень большое количество исследований посвящено управлению динамической устойчивостью технологической системы на основе различных подходов. В частности, широкий спектр работ посвящен исследованиям вибраций [9–11] и качества обработанной поверхности при изменении геометрии режущего инструмента.

Большой вклад в исследование вибраций при резании внес А.П. Соколовский [12], установив при этом зависимость амплитуды профилограммы от геометрии режущего инструмента.

Так, например, главный угол в плане ϕ значительно влияет на интенсивность колебаний (рис. 8) [12]. При уменьшении этого угла интенсивность вибраций резко возрастает. Такой характер зависимости понятен, учитывая, что при уменьшении угла ϕ растет



Таблица 1. Результаты снижения шероховатости поверхности детали при предварительной обработке поверхностно-активными веществами

Table 1. Results of part surface roughness reduction under surfactant pretreatment

Материал	Стратегия обработки	Параметры шероховатости, мкм						
		R _a	R _z	R _{max}	R _p	R _m	S _m	S _k
Капролон	Точение после обработки ПАВ	4,39	11,6	15,2	7,6	5,89	0,88	-0,17
	Точение	7,6	22,72	35,97	14,02	21,95	0,33	0,27
Текстолит	Точение после обработки ПАВ	4,88	21,16	28,80	12,36	8,22	0,15	-0,18
	Точение	10,0	40,53	48,43	26,27	22,16	0,21	0,56

Таблица 2. Результаты снижения шероховатости поверхности при обработке стеклопластика

Table 2. Results of surface roughness reduction when processing fiberglass

Вариант точения	Параметры шероховатости						
	R _a	R _z	R _{max}	R _p	R _m	S _m	S _k
Точение							
Обычное точение	12,61	32,72	30,97	14,02	21,95	0,337	0,976
С предварительной виброобработкой связующего (100 Гц, 60 мкм)	7,505	15,24	20,75	9,232	11,52	0,186	0,600

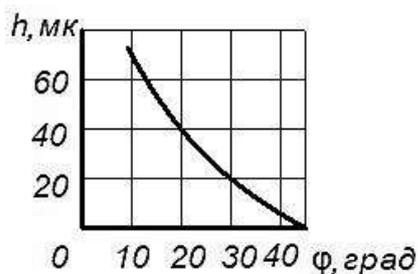


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности от главного угла в плане

Fig. 8. Surface roughness vs main angle in the plan

ширина стружки и уменьшается ее толщина, что способствует усилению вибраций.

Передний угол при резании также оказывает большое влияние на интенсивность вибраций, при увеличении которого интенсивность вибраций снижается (рис. 9) [12–16].

Также вопросы исследования зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента рассматривались в работе [13]. В данной работе получены графики зависимости шероховатости поверхности от значений переднего угла γ при обработке титанового сплава ВТ22.

Профессорско-преподавательским составом кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного

технического университета большое внимание уделяется вопросу влияния режущего инструмента на качество обработанной поверхности, а именно: в своих работах [17, 18] авторы подробно описывают влияние различных покрытий на режущий инструмент и эффективность механической обработки.

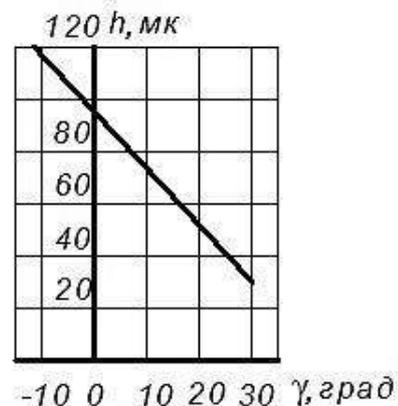


Рис. 9. Зависимость шероховатости поверхности от переднего угла

Fig. 9. Surface roughness vs front angle

Также нельзя забывать об устойчивости всей технологической системы. Вопрос повышения устойчивости процессов механической обработки был и остается актуальным

до настоящего времени. Повышению устойчивости динамики станков огромное внимание уделял отечественный ученый В.А. Кудинов [14–16]. В его работах сказано, что устойчивость динамики станков зависит в первую очередь от жесткости упругой системы станка. Чем больше жесткость, тем выше устойчивость самого процесса, но не всегда.

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ

Обобщая вышеизложенное можно сказать, что качество обработки (шероховатость) достигается посредством:

- применения рациональных режимов резания;
- изменения геометрии режущего инструмента;
- применения методов, воздействующих на физико-механические свойства обрабатываемых материалов;
- снижения относительных пространственных динамических колебаний инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки.

Из проведенного выше обзора следует, что качество обработки достигается посредством многих факторов. Поэтому с учетом взаимовлияния факторов друг на друга обеспечение качества представляет собой комплексную многофакторную задачу, для решения которой требуется разработка мето-

дики, которая будет учитывать весь комплекс этих взаимовлияний.

Для наглядности представления влияния основных факторов на шероховатость, а также их взаимовлияния между собой, целесообразно представить в виде схемы (рис. 10).

Из представленной схемы, где показаны основные взаимовлияния факторов на качество обработки, очевидно, что нет однозначного решения о приоритете тех или иных факторов при получении шероховатости поверхности. Это обуславливает использование системного подхода к постановке задач, решение которых позволит повысить эффективность обработки для достижения требуемой шероховатости.

Основные задачи – это определение установления количественных взаимовлияний друг на друга факторов, а также их приоритетов в зависимости от различных условий, позволяющих разрабатывать методики по обеспечению требуемой шероховатости при обработке резанием.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет в настоящее время выполнил ряд исследований в этом направлении [19–21], а также ведутся исследования, позволяющие оценивать влияние жесткости инструментальной оснастки на шероховатость обработанной поверхности.

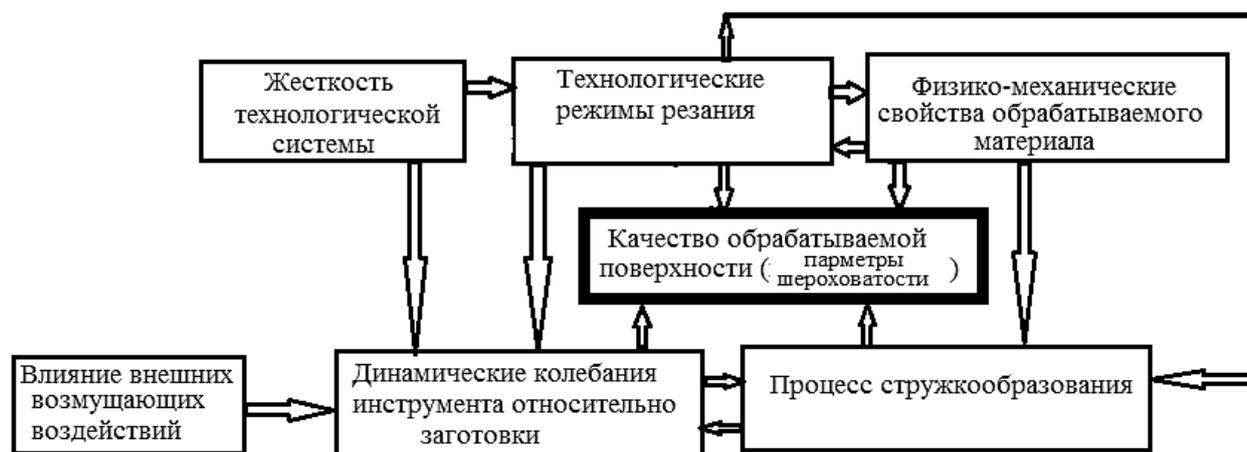


Рис. 10. Схема взаимовлияния факторов на качество обработки
Fig. 10. Diagram of mutual influence of factors on processing quality



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана схема влияния многофакторных параметров механической обработки на качество обработанной поверхности.
2. Выявлено, что исследований по влия-

нию множества факторов технологической системы на качество обработанной поверхности в полном объеме не проводилось.

3. Предложенная многофакторная схема применима для любого вида механической обработки.

Список литературы

1. Костин П.Н., Лукьянов А.В. Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент-заготовка. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 1. Р. 54–62. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-54-62>
2. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М. Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей // *Технология машиностроения*. 2018. № 11. С. 9–16.
3. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М. Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом // *Тяжелое машиностроение*. 2018. № 9. С. 24–29.
4. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М., Никитенко А.В., Стельмаков В.А. Получение заданных параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании цилиндрических отверстий // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. 2016. № I-1. С. 66–72.
5. Клушин М.И. О физических основах сверхскоростного резания. Т. XVII. Вып. 4. Горький: Изд-во ГПИ, 1961. С. 15–22.
6. Клушин М.И. Резание металлов. М.: Изд-во «Машгиз», 1956. 363 с.
7. Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Шпилев А.М., Бурков А.А. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / науч. ред. О.В. Кретинин. Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2000. 195 с.
8. Биленко С.В., Саблин П.А., Леонтьевская Н.К. Использование цветовой пирометрии при измерении температуры стружки при высокоскоростной обработке // *Контроль. Диагностика*. 2013. № 8. С. 37–43.
9. Faassen R.P.H., Van de Wouw N., Oosterling J.A.J., Nijmeijer H. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43. Iss. 14. P. 1437–1446. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00171-8)
10. Еренков О.Ю., Кравченко Е.Г., Верещагина А.С. Исследование шероховатости полимерных материалов после точения заготовок, предварительно обработанных поверхностно-активными веществами // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. 2016. № II-1. С. 23–28. [https://doi.org/10.17084/2016.II-1\(26\).4](https://doi.org/10.17084/2016.II-1(26).4)
11. Еренков О.Ю., Проценко А.Е., Шпилев А.М. Повышение прочности стеклопластика путём вибрационной обработки эпоксидного связующего // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. 2018. № IV-1. С. 94–99. [https://doi.org/10.17084/I-1\(36\).13](https://doi.org/10.17084/I-1(36).13)
12. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках // *Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов*. М.: Изд-во «Машгиз», 1958. С. 15–18.
13. Серебrenникова А.Г., Гурылев В.Б. Титановый сплав BT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 548–560. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>
14. Куудинов В.А. Автоколебания на низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании // *Станки и инструмент*. 1997. № 10. С. 16–22.
15. Куудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
16. Куудинов В.А., Чуприна В.М. Поузловой анализ динамических характеристик упругой системы станка // *Станки и инструмент*. 1989. № 1. С. 8–11.
17. Shvetsov I.V., Mokritskij B.Ya., Malukhina O.A., Rahmonov A.H., Belyakov V.N. Comparative tests of the metal cutting tools performance in the processing of stainless steels // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 441. P. 012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012052>
18. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V., et al. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings // *Coatings*. 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 8110395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
19. Саблин П.А., Жигалкин К.А. Динамика сил резания при высокоскоростном фрезеровании // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. 2019. № II-1. С. 41–49. [https://doi.org/10.17084/III-1\(38\).5](https://doi.org/10.17084/III-1(38).5)
20. Космынин А.В., Щетинин В.С., Саблин П.А. Обеспечение качества обработки материалов резанием

посредством внедрения трансформируемых управляемых звеньев в систему станочных систем // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Серия: Науки о природе и технике. Машиностроение. 2020. № V-1. С. 115–118.

21. Саблин П.А., Космынин А.В., Щетинин В.С. Управ-

ляемые шпиндельные опоры как инструмент обеспечения качества обработки. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 1019–1029. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1019-1029>

References

1. Kostin PN, Lukyanov AV. Spindle rotation speed adjustment when milling by system numerical modeling data: device-tool-workpiece. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):54–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-54-62>
2. Gimadeev MR, Davydov VM. Ensuring quality of a surface when mechanoprocessing figurine details. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2018;11:9–16. (In Russ.)
3. Gimadeev MR, Davydov VM. Correlation of the roughness parameters in milling of spherical tool. *Tyazheloe mashinostroyeniye*. 2018;9:24–29. (In Russ.)
4. Gimadeev MR, Davydov VM, Nikitenko AV, Stelmakov VA. Obtaining the desired roughness parameters for drilling and milling a cylindrical bore. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroyeniye = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical Engineering*. 2016;1-1:66–72. (In Russ.)
5. Klushin MI. *On physical foundations of ultra high-speed cutting*. Vol. XVII. Iss. 4. Gor'kij: Gorky Polytechnic Institute; 1961, p. 15–22. (In Russ.)
6. Klushin MI. *Metal cutting*. Moscow: Mashgiz; 1956, 363 p. (In Russ.)
7. Kabaldin YuG, Oleynikov AI, Shpiloyv AM, Burkov AA. Mathematical modelling of self-organizing processes in technological systems of cutting process / scientific editor OV Kretinin. Vladivostok: Dal'nauka; 2000, 195 p. (In Russ.)
8. Bilenko SV, Sablin PA, Leontyevskaya NK. Use of color pyrometry at measurement of temperature of shaving at high-speed processing. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2013;8:37–43. (In Russ.)
9. Faassen RPH, Van de Wouw N, Oosterling JAJ, Nijmeijer H. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003;43(14):1437–1446. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00171-8)
10. Erenkov OYu, Kravchenko EG, Vereshchagina AS. The study of polymeric materials roughness after workpieces turning pre-treated with surfactants. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroyeniye = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2016;11-1:23–28. (In Russ.) [https://doi.org/10.17084/2016.11-1\(26\).4](https://doi.org/10.17084/2016.11-1(26).4)
11. Erenkov OYu, Protsenko AE, Shpilev AM. Increasing the strength of fiberglass by means of epoxy binder vibration treatment. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroyeniye = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2018;14-1:94–99. (In Russ.) [https://doi.org/10.17084/1-1\(36\).13](https://doi.org/10.17084/1-1(36).13)
12. Sokolovskij AP. Vibrations when operating metal-cutting machines. In: *Issledovanie kolebanij metallo-rezhushchih stankov pri rezanii metallov = Research of metal-cutting machine vibrations when cutting metals*. Moscow: Mashgiz; 1958, p. 15–18. (In Russ.)
13. Serebrennikova AG, Gurylyov VB. VT22 titanium alloy: study of the cutting tool geometry effect on output parameters of turning process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):548–560. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>
14. Kudinov VA. Self-oscillations at low and high frequencies (motion stability) under cutting. *Stanki i instrument*. 1997;10:16–22. (In Russ.)
15. Kudinov VA. *Machine-tool dynamics*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1967, 360 p. (In Russ.)
16. Kudinov VA, Chuprina VM. Unit-by-unit analysis of dynamic characteristics of machine-tool elastic system. *Stanki i instrument*. 1989;1:8–11. (In Russ.)
17. Shvetsov IV, Mokritskij BYa, Malukhina OA, Rahmonov AH, Belyakov VN. Comparative tests of the metal cutting tools performance in the processing of stainless steels. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;441:012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012052>
18. Vereschaka A, Oganyan M, Bublikov Yu, Sitnikov N, Deev K, Pupchin V, et al. In-crease in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered compo-site nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings. *Coatings*. 2018;8(11):8110395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
19. Sablin PA, Zhigalkin KA. Dynamics of cutting forces in high speed milling. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroyeniye = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2019;11-1:41–49. (In Russ.) [https://doi.org/10.17084/11-1\(38\).5](https://doi.org/10.17084/11-1(38).5)
20. Kosmynin AV, Shchetinin VS, Sablin PA. Ensuring the quality of material processing by cutting through the introduction of transformable controlled links in the system of



machine tools. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering.* 2020;V-1;115–118. (In Russ.)

21. Sablin PA, Kosmynin AV, Shchetinin VS. Controlled spindle supports as a tool for ensuring machining quality. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2020;24(5):1019–1029. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1019-1029>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Саблин Павел Алексеевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
✉ e-mail: ikpmt@knastu.ru

Pavel A. Sablin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur 681013,
Russia;
✉ e-mail: ikpmt@knastu.ru

Щетинин Владимир Сергеевич,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
e-mail: schetynin@mail.ru

Vladimir S. Shchetinin,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur 681013,
Russia;
e-mail: schetynin@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.10.20; одобрена после рецензирования 18.02.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Information about the article

The article was submitted 20.10.20; approved after reviewing 18.02.2021; accepted for publication 29.04.2021.