

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ОБРАБОТКА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ ВИБРАЦИЙ

Наплавкова К.С.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: корпусные детали, насосные корпуса, виброабразивная обработка, квазирезонансные колебания, ультразвуковая виброобработка, акустический резонанс, контейнерная обработка, энергопотребление процесса, шероховатость.

Аннотация. Статья представляет аналитический обзор обработки корпусных деталей с квазирезонансными вибрациями и ультразвуковым наложением. Рассмотрены предпосылки энергоэффективности, схемы контейнерной обработки и кинематика рабочей среды. Обобщены решения патентов РФ №2540055, 2542915, 2584618 и 2669163. Они охватывают организацию процесса, формирование устойчивых траекторий, применение акустически резонансных камер и настраиваемых систем возбуждения. Сопоставлены ожидаемые эффекты по энергопотреблению, динамическим нагрузкам и качеству поверхности. Выводы носят обзорный характер и служат ориентиром для дальнейших исследований.

ENERGY-EFFICIENT MACHINING OF PUMP CASING PARTS USING QUASI-RESONANT VIBRATIONS

Naplavkova K.S.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: casing parts, pump casings, vibratory-abrasive processing, quasi-resonant oscillations, ultrasonic vibroprocessing, acoustic resonance, container-type processing, process energy consumption, surface roughness.

Abstract. The article presents an analytical review of machining casing parts using quasi-resonant vibrations and ultrasonic superposition. It examines the prerequisites for energy efficiency, container-type process schemes, and the kinematics of the working medium. Solutions described in Russian patents № 2540055, 2542915, 2584618, and 2669163 are summarized. They cover process organization, formation of stable trajectories, the use of acoustically resonant chambers, and tunable excitation systems. Expected effects on energy consumption, dynamic loads, and surface quality are compared. The conclusions are of a review nature and serve as guidance for further research.

Введение

В современных условиях машиностроительного производства возрастают требования к качеству и энергоэффективности обработки корпусных деталей. Вибрационные методы обработки уже широко применяются для снятия заусенцев, шлифования и полирования поверхностей [1]. Одним из перспективных направлений является комбинирование вибрационных воздействий с другими видами энергии (ультразвук, электромагнитные поля и др.). Квазирезонансный режим вибрационных систем позволяет поддерживать высокую амплитуду колебаний при небольшой затрате энергии, что улучшает эффективность съема материала. В частности, введение высокочастотных колебаний приводит к дроблению абразивных частиц и дополнительным микротрещинам, ускоряя разрушение обрабатываемого материала [2]. Цель

статьи проанализировать современные технологии обработки корпусных деталей с вибрационными и ультразвуковыми методами, а также рассмотреть потенциальную энергоэффективность квазирезонансных режимов.

Теоретические основы

В основе вибрационной обработки лежит передача колебаний заготовке через абразивную смесь, что обеспечивает поверхностно-пластическое деформирование и ускоренное удаление материала. Основными технологическими факторами выступают амплитуда и частота колебаний, характеристики рабочей среды и материала детали [1].

С увеличением частоты (в частности до ультразвукового диапазона 20-40 кГц) и оптимальной амплитуды колебаний усиливается дробление абразивных частиц, и уменьшаются усилия резания. Например, применение ультразвукового возбуждения позволяет снизить усилие резания на 30-50% [3] и достичь более мелкозернистой остаточной обработки. Дополнительная интенсификация достигается управлением режимами процесса: поэтапным уменьшением зернистости абразива и подачей рабочей жидкости, обеспечивающими непрерывный переход от грубой шлифовки к тонкой доводке и стабильную очистку зоны обработки [4]. В совокупности такие меры повышают однородность результатов, увеличивают производительность и снижают износ оборудования, что особенно важно при обработке корпусных деталей сложной формы.

Анализ патентов

Анализ современных патентных решений показывает, что энергоэффективность вибрационной обработки корпусных деталей достигается за счёт целенаправленного формирования квазирезонансных режимов и рациональной организации процесса. В патенте **№ 2669163** предложена настраиваемая по жёсткости и центру масс система возбуждения, позволяющая получить требуемую амплитуду на рабочем столе при минимальной отдаче на вибровозбудителе, тем самым повышается КПД передачи энергии [5]. Патент **№ 2584618** реализует акустический резонанс в резонаторной камере и за счёт управляемого звукового поля ускоряет упрочнение/очистку внутренних полостей, снижая продолжительность цикла [6]. Технологическая база контейнерных схем закреплена в патенте **№ 2540055**, эллиптическая траектория движения рабочей среды и демпфирование пневмоамортизаторами стабилизируют режим, уменьшают динамические нагрузки на узлы привода и повышают надёжность при обработке габаритных корпусов [7]. Методическая часть по маршрутизации процесса отражена в патенте **№ 2542915**, где поэтапное уменьшение зернистости и организованная подача жидкости обеспечивают предсказуемую шероховатость и сокращение длительности операции [8].

Суммарно эти решения закрывают ключевые метрики энергоэффективности. Повышается КПД привода за счёт резонансной настройки и снижения паразитных потерь [5, 7], уменьшается тепловая и силовая нагрузки при обработке внутренних объёмов и канальных зон [8], а также снижается время цикла и вариабельность результата благодаря регламенту стадий и очистке зоны резания [6]. Для корпусных деталей сложной формы это даёт практический

эффект в виде меньшей удельной энергии на единицу снятого слоя при сохранении требуемого качества поверхности и упрочнения.

Преимущества и перспективы

Квазирезонансные вибрации и ультразвук дают две ключевые выгоды. Во-первых, резонансная настройка системы обеспечивает требуемую амплитуду при меньшей мощности, повышая КПД и снижая потери на узлах привода [5]. Во-вторых, наложение высокочастотных колебаний на низкочастотную вибрацию переводит контакт в импульсный режим, уменьшая силы резания, что повышает производительность и снижает износ инструмента [3]. Для наружных контуров устойчивость процесса обеспечивают эллиптическая кинематика рабочей среды и демпфирование, снижающие динамические нагрузки [5], а стабильность контейнерной обработки – корректный выбор загрузки и кинематики [6]. Экспериментально фиксируется снижение шероховатости при наложении ультразвука до $\sim 2,3$ мкм, данные сведены в таблицу 1 [9, 10].

Табл. 1. Шероховатость поверхности после вибрационной обработки

Материал/процесс	Метод	Ra, мкм
Сталь STAVAX (формоиспользуемая), полирование	Без ультразвуковых колебаний	0,017
Сталь STAVAX (формоиспользуемая), полирование	С ультразвуковыми колебаниями	0,014
Ti-6Al-4V, точение	ультразвуково-ассистированное (UAM/LUAM)	$\approx 0,7-0,8$

Заключение

Квазирезонансная вибрационная обработка с ультразвуковым наложением обеспечивает требуемую амплитуду при меньшей мощности и переводит контакт в импульсный режим. В итоге снижаются силы резания, время операций и удельная энергия, при одновременном росте качества поверхности. Рассмотренные патентные решения подтверждают промышленную реализуемость подхода для корпусных деталей, включая крупногабаритные.

Список литературы

1. Вяликов И.Л. Интенсификация виброабразивной обработки наложением ультразвукового воздействия: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2014. – 19 с.
2. Михайлов А.Н., Таровик А.Б. Снижение силы резания при точении тонкостенных цилиндрических изделий с применением ультразвуковых колебаний инструмента // Машиностроение и машиноведение. – 2016. – Вып. 47. – С. 143-148.
3. Jamil M.F., Li Q., Keymanesh M., Feng P., Zhang J. A Critical Review of Ultrasonic-Assisted Machining of Titanium Alloys // Machines. 2025, vol. 13(9), p. 844. DOI: 10.3390/machines13090844.
4. Yang Z., Liu Y., Zhou M., Wang X. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials // Measurement. 2020, vol. 165, p. 108163. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108163.
5. Патент №2669163 РФ. Способ возбуждения колебаний и устройство для его осуществления / А.П. Хоменко, С.В. Елисеев, А.В. Елисеев, А.И. Орленко, Д.Х. Нгуен, А.Г. Пнев, Р.С. Большаков, А.К. Мозалевская. – Заявка №2015143609 от 12.10.2015; опубл. 08.10.2018, Бюл. №11.

6. Патент №2584618 РФ. Способ обработки металлических деталей в условиях акустического резонансного воздействия и устройство для его осуществления / П.С. Каныгин, И.В.Черемнов, А.Ю. Никитин, А.Г. Дулин, О.В. Ольшанский. – Заявка №2013157878 от 24.12.2013; опубл. 20.05.2016, Бюл. №14.
7. Патент №2540055 РФ. Вибрационный станок для отделочно-упрочняющей обработки деталей / А.Г. Березкин, Н.А. Исайкин. – Заявка №RU2012157674/02 от 28.12.2012; опубл. 27.01.2015, Бюл. №3.
8. Патент №2542915 РФ. Способ вибрационной обработки / Д.А. Ружников. – Заявка №2013104793 от 05.02.2013; опубл. 10.08.2014, Бюл. №22.
9. Dominguez-Caballero J., Ayvar-Soberanis S., Kim J.W., Roy A. Hybrid simultaneous laser- and ultrasonic-assisted machining of Ti-6Al-4V alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023, vol. 125, pp. 1903-1916.
10. Shiou F.-J., Pan J.-N., Ding Z.-L., Lin S.-P. Reduction in the Volumetric Wear of a Ball Polishing Tool Using Ultrasonic-Vibration-Assisted Polishing // Lubricants. 2022, vol. 10(12), p. 339.

Сведения об авторе:

Наплавкова Ксения Сергеевна – студентка.