



УДК 621.9.02

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСБАЛАНСА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАЛАДОК
НА ВЫХОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ**© **А.В. Савилов¹, Д.Ю. Николаев², А.Ю. Николаев³**^{1,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.²SAA Софтвар Инжиниринг ГмбХ,
А-1100, Австрия, г. Вена, ул. Гудрунштрассе, 184/4.

Проведен анализ требований основных стандартов в области балансировки инструмента, экспериментальной оценки влияния класса балансировки инструментальной наладки на выходные характеристики процесса фрезерования и на их основе формулировки базовых рекомендаций по качеству балансировки концевых фрез. Экспериментально установлено, что требования к балансировке инструментальных наладок, выдвигаемые производителями мотор-шпинделей для фрезерных станков, являются чрезмерными, а переход (при оценке качества балансировки) от стандарта ISO 1940/1 к новому стандарту DIN 69888 является технологически и экономически оправданным. Выявлено, что класс балансировки инструментальных наладок в соответствии с требованиями ISO 1940/1 не оказывает определяющего действия на выходные параметры высокопроизводительного фрезерования.

Ключевые слова: балансировка инструмента; высокоскоростное фрезерование; высокопроизводительное фрезерование; механообработка; инструментальная наладка; концевые фрезы; фрезерование; твердый сплав.

**STUDY OF INSTRUMENTAL ADJUSTMENT IMBALANCE EFFECT ON MILLING OUTPUT
PARAMETERS****A.V. Savilov, D.Yu. Nikolaev, A.Yu. Nikolaev**Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.SAA Software Engineering GmbH,
184/4 Gudrunshtrasse, Vienna, Austria, A-1100.

The paper performs the analysis of the main requirements to tools balancing and experimental evaluation of the effect of the class of instrumental adjustment balancing on the output characteristics of milling. The latter serve the basis for formulating of major recommendations on the balancing quality of end mills. It has been experimentally determined that the requirements for instrumental adjustment balancing imposed by the producers of motor spindles for milling machines are excessive, while the transition (when evaluating the balancing quality) from the ISO 1940/1 standard to the new DIN 69888 standard is technologically and economically justified. It is found that the class of instrumental adjustment balancing in accordance with the requirements of ISO 1940/1 does not have a decisive effect on the output parameters of high-performance milling.

Keywords: tool balancing; high-speed milling; high-performance milling; machining; instrumental adjustment; end mills; milling; hard alloy.

Балансировка вращающегося инструмента – сравнительно новая практика в машиностроении. Она получила распространение после внедрения технологии вы-

сокоскоростной механообработки. Несмотря на тривиальность процесса, в целом многие его нюансы до сих пор не ясны. В частности, нет единого мнения о том, каки-

¹Савилов Андрей Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации машиностроения Института авиационного машиностроения и транспорта, тел.: (3952) 405280, e-mail: saw@istu.edu
Savilov Andrei, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Equipment and Automation of Mechanical Engineering of the Institute of Aircraft Engineering and Transport, tel.: (3952) 405280, e-mail: saw@istu.edu

²Николаев Димитрий Юрьевич, инженер-машиностроитель по автоматизации и поддержке, e-mail: nikdimitry@yandex.ru

Nikolaev Dimitry, Mechanical Engineer for the Automation and Support, e-mail: nikdimitry@yandex.ru

³Николаев Андрей Юрьевич, техник Института авиационного машиностроения и транспорта, тел.: (3952) 481859, e-mail: andrnikolajev@gmail.com

Nikolaev Andrei, Technician of the Institute of Aircraft Engineering and Transport, tel.: (3952) 481859, e-mail: andrnikolajev@gmail.com

ми требованиями и нормативными документами следует руководствоваться при балансировке инструмента, на что и в какой степени влияет остаточный дисбаланс инструментальной наладки, насколько хорошо должен быть сбалансирован конкретный инструмент для выполнения тех или иных задач.

Производители мотор-шпинделей для высокоскоростных фрезерных обрабатывающих центров устанавливают свои требования к качеству балансировки. Анализ данных требований ведущих компаний показывает, что они существенно отличаются.

Долгое время при балансировке инструмента было принято руководствоваться требованиями международного стандарта ISO 1940/1 [1], который регламентирует балансировку жестких роторов. Очевидно, что деформируемая под воздействием сил резания инструментальная наладка, к такому не относится.

В 2011 г. появился стандарт DIN 69888 [2], регулирующий вопрос балансировки именно вращающегося инструмента. Для определения требуемого качества балансировки инструментальной наладки согласно требованиям DIN 69888 в стандарте предложены диаграммы зависимости допустимого остаточного дисбаланса от скорости вращения шпинделя. По сравнению с ISO 1940/1 данный стандарт предъявляет значительно более мягкие требования к качеству балансировки инструментальных наладок. Так, например, некий инструмент с интерфейсом HSK63 и массой 1 кг для стандартной обработки на 23000 об/мин может по DIN 69888 иметь остаточный дисбаланс 11 г·мм, что для тех же параметров приблизительно соответствует классу балансировки G30 по ISO 1940/1. Минимально целесообразный дисбаланс для такого инструмента составляет 7 г·мм по DIN 69888 и соответствует классу балансировки G16 по ISO 1940/1. Для сравнения отметим, что большинство производителей мотор-шпинделей требуют балансировать инструментальные наладки для указанной частоты вращения по классу не хуже G6.3.

Также они до сих пор не используют данный стандарт для установки требований к инструментальным наладкам.

В отечественной литературе данный вопрос не освещен должным образом, однако публикации В.А. Потапова, посвященные оценке реального качества балансировки инструмента и его воспроизводимости, несомненно, заслуживают внимания [3].

Отдельный интерес представляет интенсификация режимов резания для вращающегося инструмента. Исследователи предлагают различные подходы в моделировании процесса фрезерования и сверления [4–9]. В данных работах математические модели учитывают механические свойства инструментальных наладок и обрабатываемых материалов, конструктивные параметры и геометрию режущей части инструмента. Однако математические модели процессов резания в вышеперечисленных работах не учитывают дисбаланс инструментальной наладки.

Исследования проводились с целью анализа требований мировых стандартов в области балансировки инструмента, экспериментальной оценки влияния качества балансировки инструментальной наладки на выходные характеристики процесса фрезерования и на их основе формулировки базовых рекомендаций по качеству балансировки концевых фрез.

Схема и методика проведения эксперимента

Для проверки влияния качества балансировки инструментальных наладок на процесс фрезерования и качество обработанной детали было проведено экспериментальное фрезерование алюминиевых заготовок. Балансировочная машина Haimer TD2009 Comfort Plus предназначена для балансировки инструментальных наладок в сборе.

Тестовое фрезерование уступов в алюминиевой заготовке производилось на универсальном обрабатывающем центре HSC 75 linear.

Эксперимент заключался в продольном фрезеровании уступов в алюми-

ниевой заготовке за один проход при фиксированных для конкретного инструмента режимах резания и варьировании качества балансировки инструментальной наладки в сборе.

Перед проведением обработки инструментальные наладки были сбалансированы методом высверливания избыточного материала до классов G0.5 для сборной фрезы R790-032C5S2-16M и G0.8 для цельной фрезы AZ-3D16R6L65 (рис. 1, 2). В дальнейшем дисбаланс добавлялся искусственно максимум до G40 (согласно требованиям безопасности по DIN 68999) при помощи балансировочных колец.



Рис. 1. 3D-модель сборной фрезы R790 со сменными твердосплавными пластинами



Рис. 2. 3D-модель фрезы AZ-3D16R5L65

В ходе обработки контролировались вибрационные нагрузки на опорах шпинделя при помощи внутренних средств диагностики обрабатывающего центра HSC 75

linear, а также узконаправленного микрофона, входящего в состав аппаратно-программного комплекса CutPro. Проводилась запись сил резания при помощи динамометрической платформы Kistler 9253B23, установленной на стол обрабатывающего центра.

После обработки определялась шероховатость поверхности с использованием профилометра Form Talysurf i200, Taylor Hobson.

Инструментальная наладка включает в себя следующие элементы: базовый держатель Capto 5 для инструментального конуса HSK-63A с втулкой для внутреннего подвода СОЖ и фрезу R790-032C5S2-16M со сменными твердосплавными пластинами R790-160408PH-NM H13A.

После сборки производилась проверка исходного качества балансировки инструментальной наладки согласно требованиям стандартов ISO 1940/1 (рис. 3) и DIN 69888 (рис. 4) для чистовой обработки с максимальной частотой вращения шпинделя равной 28000 об/мин.

Поскольку в соответствии с рекомендациями производителя сменные пластины из твердого сплава H13A допускаются в работу на скоростях резания до 935 м/мин, то согласно рекомендациям DIN 69888 производилась статическая балансировка инструментальной наладки в одной плоскости.

Инструмент AZ-3D16R6L65 представляет собой цельную концевую трехзубую фрезу из твердого сплава группы обрабатываемости K40 по ISO диаметром 16 мм [10]. Инструментальная наладка наряду с указанной фрезой включает в себя базовый держатель C5 для инструментального конуса HSK-63A с втулкой для внутреннего подвода СОЖ и зажимной гидравлический патрон, а также цангу.

После сборки производилась проверка исходного качества балансировки инструментальной наладки согласно требованиям стандартов ISO 1940/1 (рис. 5) и DIN 69888 (рис. 6) для чистовой обработки с максимальной частотой вращения шпинделя равной 28000 об/мин.

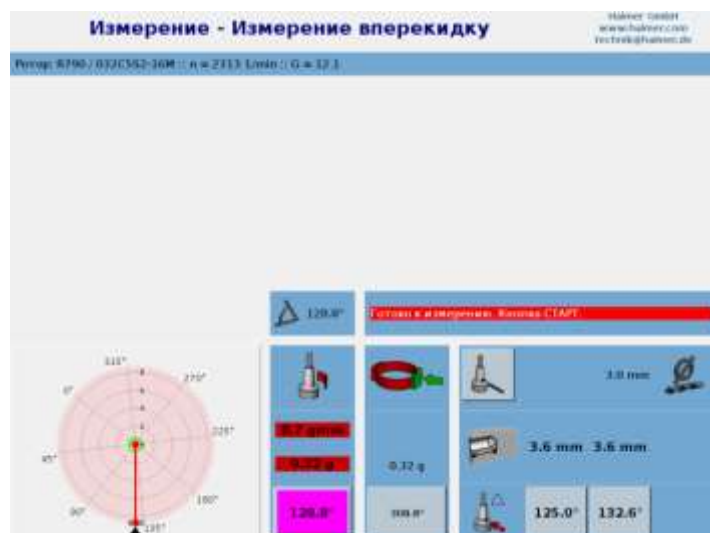


Рис. 3. Качество статической балансировки инструментальной наладки R790-032C5S2-16M согласно требованиям ISO 1940-1

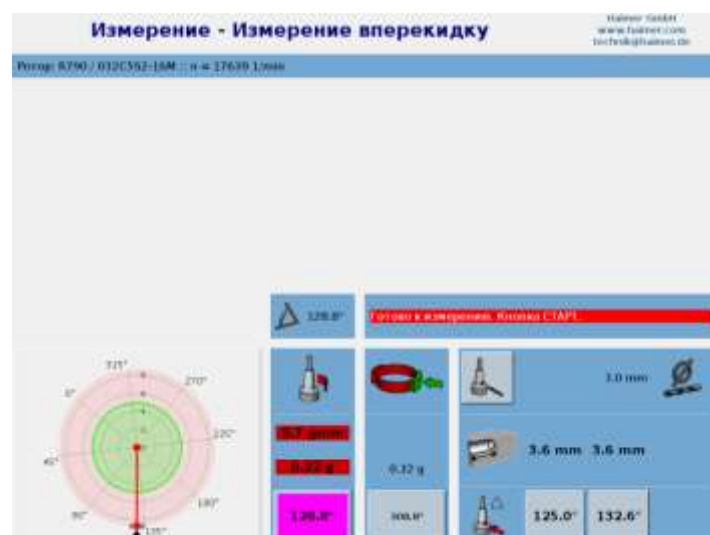


Рис. 4. Качество статической балансировки инструментальной наладки R790-032C5S2-16M согласно требованиям DIN 69888



Рис. 5. Качество динамической балансировки инструментальной наладки AZ-3D16R6L65 согласно требованиям ISO 1940-1



Рис. 6. Качество динамической балансировки инструментальной наладки AZ-3D16R6L65 согласно требованиям DIN 69888

Производилась динамическая балансировка, поскольку фреза рассчитана на высокие (до 2000 м/мин) скорости резания, а также, поскольку длина наладки в сборе от торца шпинделя до конца фрезы превышает 2,2 базовых диаметра $D_{B_HSK63}=63$ мм, инструментального конуса ($228,945 > 138,6$ мм).

Очевидно, что стандарт ISO 1940/1 предъявляет гораздо более жесткие требования к балансировке инструмента: так, только что собранная наладка имеет в обеих плоскостях балансировки дисбаланс порядка 30 г·мм. Согласно ISO 1940/1 подобный дисбаланс означает класс балансировки G33.0 для 28000 об/мин либо класс G1.0, но только для 846 об/мин. Использование данного инструмента недопустимо. Стандарт DIN 69888, напротив, допускает использование данной инструментальной наладки для чистовой обработки деталей уже на скорости 22306 об/мин.

Как показала практика, балансировка гидравлических патронов сопряжена с определенными трудностями. Дело в том, что при раскрутке инструментальной наладки в балансировочной машине до 1100 об/мин из дюз для закачки масла начинают сочиться его остатки под действием центробежных сил. Если на начальном этапе при остаточном дисбалансе 32 г·мм и классе балансировки G33.0 данный факт не оказывает значительного влияния,

то уже по достижении класса G3–G5 дисбаланс, вносимый каплями масла, становится сопоставим с реальным дисбалансом наладки. Игнорирование данного явления приводит к принятию неверных решений в процессе балансировки, следовательно, искомый класс G2,5 может быть недостижим.

Результаты балансировки инструментальных наладок

Были проведены опытные работы по балансировке инструмента по наивысшему достижимому классу в соответствии с ISO 1940/1, но не ниже используемого на практике класса G1.0. В результате удалось добиться класса балансировки G0.5 (рис. 7) и G0.8 (рис. 8) при работе на 28000 об/мин для сборной со сменными пластинами и цельной твердосплавной фрезами соответственно. Достигнутое качество является априори избыточным, и его достижение на практике связано с определенными трудностями.

Неточности и ошибки в процессе балансировки могут быть связаны с неоднозначной посадкой инструментального конуса HSK-63A в адаптер балансировочной машины, а также эксцентриситетом посадки в целом [6]. Конструктивно интерфейс HSK-63A предусматривает посадку по поверхности конуса и двум торцам на два кулачка различной конфигурации. Измерение «вперекидку» предполагает поворот



Рис. 7. Результат балансировки инструментальной наладки фрезы R790-032C5S2-16M



Рис. 8. Результат балансировки инструментальной наладки фрезы AZ-3D16R6L65

инструментальной наладки на 180° в процессе балансировки и, следовательно, свободную и неплотную посадку на кулачки. Для достижения лучших результатов необходимо на всем этапе балансировки соблюдать выбранный способ установки инструментальной наладки в адаптер балансировочной машины и подворачивать до соприкосновения с кулачком всегда в одну сторону. Таким образом, можно минимизировать влияние эксцентриситета посадки на итоговое качество балансировки, переведя погрешность, связанную с ним, в разряд статических.

Параметры и режимы резания

Фрезерование производилось попутно с обдувом воздухом и без примене-

ния СОЖ. Стартовые режимы резания приведены в таблице.

Результаты эксперимента

Инструментом R790-032C5S2-16M производилось продольное фрезерование уступа глубиной 7 мм и шириной 24 мм (75% D_c). Скорость вращения шпинделя 20200 об/мин, подача 12120 мм/мин (0,2 мм/зуб). Варьировалось качество балансировки инструмента от G0.5 до G37.4 по ISO 1940/1.

Результаты эксперимента показали, что сборная трехзубая фреза Sandvik Coromant R790-032 обладает высокой жесткостью и не нуждается в дополнительной балансировке после сборки. Не было зафиксировано влияния качества балансировки

**Режимы резания и инструмент**

Инструмент	Глубина резания a_p , мм	Ширина резания a_e , мм	Подача стола V_f , мм/мин	Скорость резания V_c , м/мин	Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹	Подача на зуб f_z , мм/зуб
R790-032C5S2-16M	12	37,5	2482	650	4138	0,2
AZ-3D16R6L65	20	4,8	6720	1407,4	28000	0,08

инструментальной наладки как на качество обработанной поверхности, так и на силы резания. Вибрационное состояние системы шпиндель – инструментальная наладка соответствовало требованиям ISO 1940/1 на всем диапазоне исследованных классов балансировки инструмента (рис. 9).

Инструментом AZ-3D16R6L65 производилось снятие припуска на чистовую обработку величиной 0,3 мм на максимальную глубину, предусмотренную конструкцией фрезы – 20 мм. Скорость вращения шпинделя по результатам модального анализа 15000 об/мин, подача 3600 мм/мин (0,08 мм/зуб). Варьировалось качество балансировки инструмента от G0.8 до G36.7 по ISO 1940/1.

Класс балансировки G0.8 для 28000 об/мин также является заведомо избыточным для обработки на данном режиме. Тем не менее в результате обработки была получена поверхность высокого качества.

Цельная твердосплавная трехзубая фреза AZ-3D16R6L65 показала стабильную работу на режимах, рекомендованных модальным анализом [11]. На рассмотренном диапазоне классов балансировки инструментальной наладки были зафиксированы вибрации относительно постоянной небольшой амплитуды. Зависимость амплитуды вибраций от класса балансировки инструментальной наладки не прослеживается.

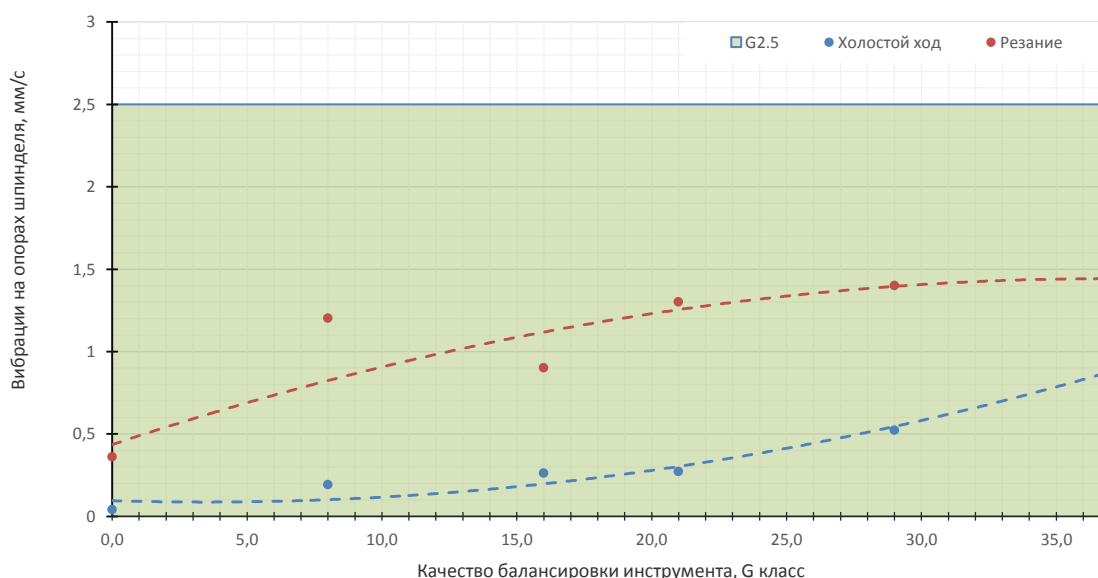


Рис. 9. Зависимость вибрационного состояния шпинделя станка от качества балансировки инструментальной наладки с фрезой R790-032

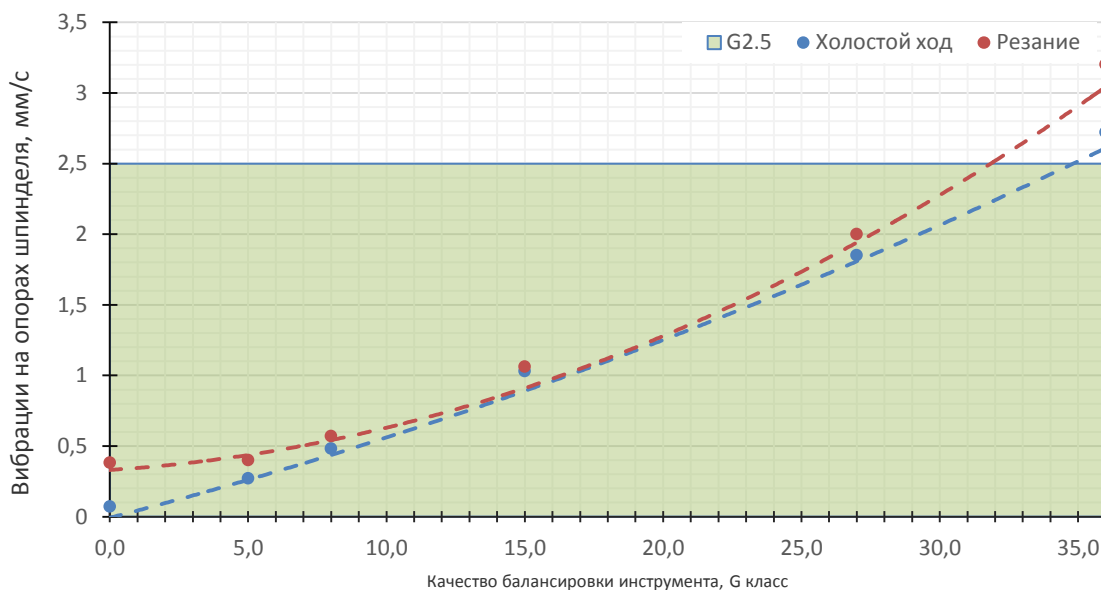


Рис. 10. Зависимость вибрационного состояния шпинделя станка от качества балансировки инструментальной наладки с фрезой AZ-3D16R6L65 при $a_e=0,3$ мм

Вибрационное состояние системы шпиндель – инструментальная наладка отвечало требованиям ISO 1940/1 вплоть до класса балансировки инструмента G33 (рис. 10).

Очевидно, что идеально сбалансированный инструмент не имеет преимуществ перед инструментом, отвечающим минимальным требованиям безопасности по DIN 69888.

Цельная твердосплавная трехзубая фреза AZ-3D16R6L65 показала стабильную работу на режимах, рекомендованных модальным анализом. Так же, как и при работе с меньшим припуском, на рассмотрен-

ном диапазоне классов балансировки инструментальной наладки были зафиксированы вибрации относительно постоянной небольшой амплитуды. Зависимость амплитуды вибраций от класса балансировки инструментальной наладки не прослеживается.

С увеличением остаточного дисбаланса медленно падало качество обработанной поверхности. Тем не менее даже при минимальном качестве балансировки качество поверхности соответствовало поверхности после чистового фрезерования (рис. 11).

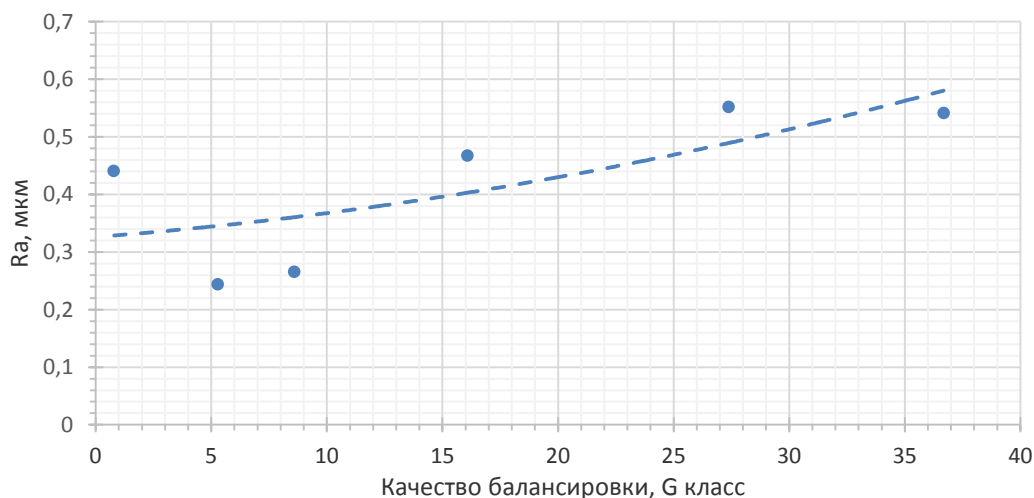


Рис. 11. Зависимость качества обработанной поверхности от класса балансировки инструментальной наладки

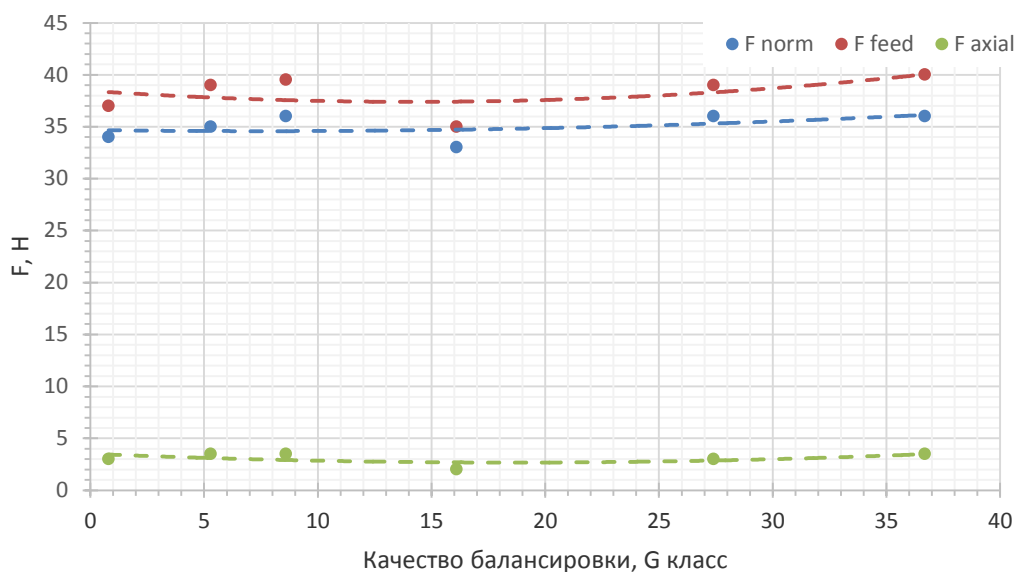


Рис. 12. Зависимость средних амплитудных значений сил резания от качества балансировки инструментальной наладки

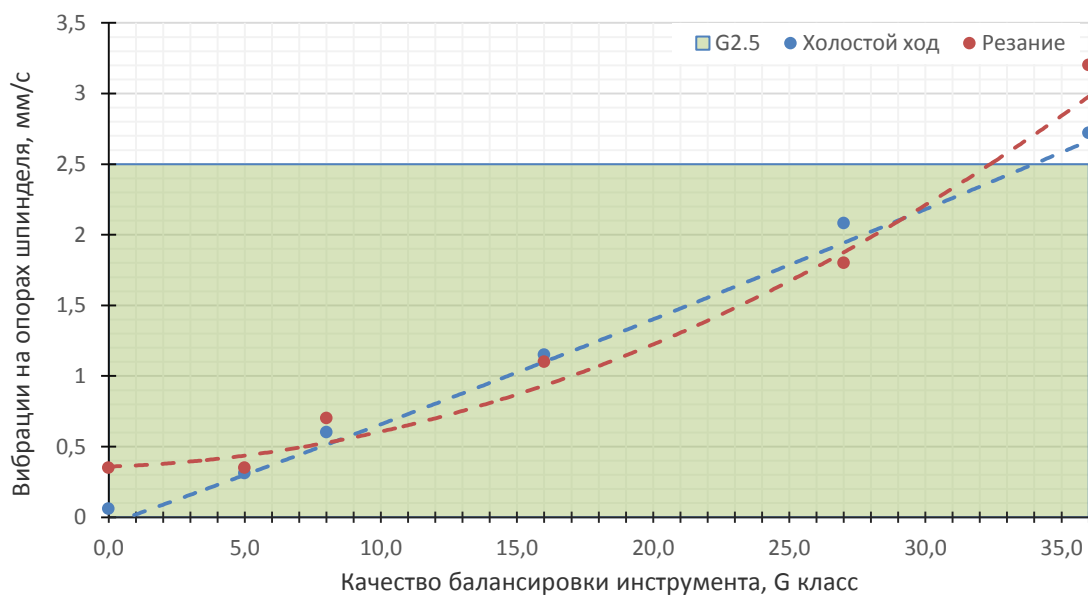


Рис. 13. Зависимость вибрационного состояния шпинделя станка от качества балансировки инструментальной наладки с фрезой AZ-3D16R6L65 при $a_e=0,5$ мм

Влияние качества балансировки на величину сил резания для данного режима не отмечено (рис. 12).

Вибрационное состояние системы шпиндель – инструментальная наладка отвечало требованиям ISO 1940/1 вплоть до класса балансировки инструмента G33 (рис. 13).

Заключение

По результатам проведенных ис-

следований установлено, что балансировка инструментальных наладок не оказывает определяющего действия на выходные параметры фрезерования, и, следовательно, требования экспериментального стандарта DIN 69888 к качеству балансировки вращающегося инструмента обоснованы. Таким образом, рекомендуется применение на практике указанного стандарта взамен действующего ISO 1940/1.



Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатех-

ники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Статья поступила 04.06.2015 г.

Библиографический список

1. ISO/FDIS 1940-1:2002(E). Mechanical vibration – Balance quality requirements of rigid rotors – Part 1: Specification and verification of balance tolerances. Geneva: ISO TC 108/SC 1/WG 8, 2002. 36 p.
2. DIN 69888:2008-09. Auswuchtsanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme. 2008. 37 p.
3. Потапов В.А. Оценка реального качества балансировки инструментов [Электронный ресурс]. URL: www.Rstanok.ru/articles/13. 2005 (27.04.2015).
4. Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. – Cambridge University Press, 2012. 366 p.
5. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015. Vol. 89. pp. 208–220.
6. Киселев И.А. Моделирование динамики процесса фрезерования тонкостенных сложнопрофильных деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06, М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 21 с.
7. Петраков Ю.В., Драчёв О.И. Моделирование процессов резания. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 240 с.
8. Ahmadi K., Altintas Y. Identification of Machining Process Damping Using Output-Only Modal Analysis, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014. V. 136. 13 p.
9. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах / И.В. Горбунов [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4 (4). С. 846–853.
10. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей и твердых сплавов / А.В. Савилов [и др.] // Вестник ИрГТУ. 2013. № 6 (77). С. 26–33.
11. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования / А.В. Савилов [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. № 6 (2). С. 476–479.