

УДК 621.813


DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-37-43

Экспериментальное исследование влияния усилия затяжки болтов на резонансные частоты консольно закрепленной балки

М.С. Куц

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

An Experimental Study of the Effect of Screw Tightening on the Resonance Frequencies of a Cantilever Beam

M.S. KutsBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: kuts@bmstu.ru

i Вибрации, возникающие в процессе обработки деталей, оказывают существенное влияние на точность технологических машин. При имитации динамического поведения машины подходы, основанные на упрощенном моделировании деталей и узлов, не дают достоверных результатов, так как предусматривают контакт идеально гладких поверхностей, а детальное моделирование контактного слоя требует больших вычислительных затрат и трудноосуществимо для большинства расчетных задач машиностроения. В связи с этим наибольшее распространение нашел подход, базирующийся на моделировании контактного слоя как третьего тела, параметры которого зависят от многих факторов, в частности от давления в этом слое. Приведены результаты экспериментов по определению влияния усилия затяжки болтов резьбового соединения на резонансные частоты образца, состоящего из основания и балки, консольно закрепленной на нем. Исследования выполнены исходя из предположения о нелинейной зависимости податливости контактного слоя от контактного давления. Получены зависимости резонансной частоты от усилия затяжки для различных площадей контакта.

Ключевые слова: технологические машины, податливость контактного слоя, нелинейные колебания, резонанс сборных узлов, собственные частоты машины

i The vibrations arising in the process of machining, have a significant effect on the accuracy of technological machines. When simulating the dynamic behavior of a machine, approaches based on simplified modeling of parts and assemblies do not yield reliable results, because they consider the contact of perfectly smooth surfaces, while detailed simulation of the contact layer involves large computational costs and is difficult to perform for most engineering tasks. In this context, the approach based on modeling the contact layer as a third body, the parameters of which depend on many factors, such as the pressure in the contact layer, has become widely adopted. In this paper, the results of experiments to determine the effect of the tightening force of screws of a threaded joint on the resonant frequencies of a sample consisting of a base and a cantilever fitted beam are presented. The studies are performed on the assumption of a nonlinear dependence of the pliability of the contact layer on the contact pressures. As a result, the dependencies of the resonance frequency on the tightening forces for different cases of the contact area are obtained.

Keywords: technological machines, contact pliability, nonlinear vibrations, assembled unit resonance, natural frequencies

При обработке деталей на металлорежущих станках существенное влияние на их точность оказывает амплитуда колебаний, возникающих в процессе резания [1]. Чтобы избежать явления резонанса, важно знать его частоту. В сложных конструкциях, таких как металлорежущие станки, состоящих из большого количества деталей, собственные частоты машины, зависящие не только от свойств отдельных деталей, но и от условий их закрепления и сопряжения между собой, обладают дополнительной податливостью.

Один из подходов к имитации податливого контакта — моделирование контактного слоя с помощью пружин некоторой жесткости [2]. В общем случае жесткость пружин можно определить тремя способами:

- 1) идентификацией по результатам экспериментов;
- 2) моделированием на микроуровне;
- 3) на основе априорных данных.

Недостатком первого способа является невозможность применения на этапе проектирования, так как требуется узел для проведения экспериментов [3, 4]. Второй подход, нуждающийся в информации о геометрии и составе исследуемого объекта, часто используют для вычисления статических параметров композитных материалов [5, 6]. Развитию третьего способа посвящены работы [7–12], где, в частности, описана зависимость сближения соединяемых деталей в контактном слое от давления в нем, имеющая нелинейный характер. В общем случае [7, 8] сближение определяется выражением

$$\delta = cp^m,$$

где c — коэффициент; p — контактное давление; m — показатель степени, обычно полу-

чаемый по результатам экспериментов, для большинства резьбовых соединений машин $m = 0,5$ [9–12].

Характерные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для систем с нелинейной восстанавливающей силой приведены на рис. 1. В зависимости от характера нелинейности восстанавливающей силы различают жесткие и мягкие системы [13, 14]. На промежутке частот $[\omega_-, \omega_+]$ возникает неопределенность: с какой именно амплитудой A будут происходить колебания. Например, при возрастании частоты возбуждающего воздействия для жесткой системы (и при убывании для мягкой) амплитуда сигнала отклика будет изменяться по кривой $KRLMN$, а при убывании (возрастании) — по кривой $NMQRK$.

Таким образом, можно наблюдать гистерезис. Причем у нелинейных колебательных систем резонансная частота зависит не только от механических характеристик системы, но и от условий нагружения. Поэтому исследование таких систем сопряжено с трудностями. В частности, при разложении в ряд Фурье затухающих нелинейных колебаний происходит смазывание пика резонанса [15, 16]. Вследствие этого в данном исследовании резонансную частоту находили методом непосредственного определения амплитуды при варьировании частоты колебаний.

Зачастую на корпусных деталях предусмотрены опорные пластики (ОП) [17, 18] для крепления корпусов к основанию и других деталей к ним. При этом из технологических соображений площадь ОП стараются минимизировать. Считается, что наличие ОП увеличивает запас прочности резьбовых соединений по нераскрытию стыка, однако влияние первых на жесткость вторых не изучено.

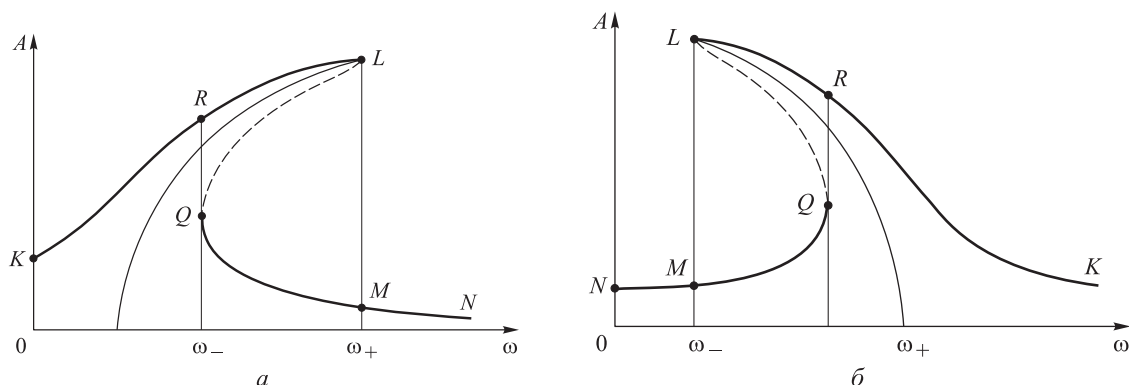


Рис. 1. АЧХ жесткой (а) и мягкой (б) нелинейных колебательных систем

Цель работы — исследование влияния усилия затяжки болтов и конфигурации контактирующих поверхностей соединяемых деталей на их резонансные частоты исходя из предположения о нелинейности колебательной системы.

Описание экспериментальной установки и метода исследования. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2, а. Для определения влияния условий закрепления основания и балки на резонансные частоты системы изготовлен образец для испытаний 1, изображенный на рис. 2, б. В качестве ОП использованы подкладные пластины 12 толщиной 2 мм и шириной 7, 10 и 15 мм. Для нахождения резонансной частоты образец закрепляли на вибростенде 4 и подвергали вибровоздействию возбуждающей силой при различных значениях момента затяжки болтов 7.

В целях выявления возможного гистерезиса на АЧХ для каждого значения момента затяжки $T_{зат}$ проведено два измерения. В первом частоту возбуждения плавно увеличивали с 600 до 1800 Гц (указанный диапазон выбран из предварительных экспериментов, в которых было найдено приблизительное значение первой резонансной частоты), во втором — плавно уменьшали от 1800 до 600 Гц. Постоянная ам-

плитуда вибровоздействия поддерживалась системой управления 2 с помощью акселерометра, выполняющего роль датчика обратной связи 11. Сигнал отклика измеряли посредством акселерометра 9. Момент затяжки контролировали динамометрическим ключом со стрелочным индикатором часового типа и ценой деления 0,2 Н·м.

В процессе проведения измерений обнаружено, что система — объект исследования — имеет высокую добротность, в результате чего система управления теряет устойчивость в зоне резонанса и амплитуда сигнала A многократно повышается при прямом проходе или снижается при обратном (рис. 3). На спектре сигнала отклика такая потеря устойчивости выглядит как резкий всплеск (при прямом проходе) или как провал (при обратном проходе) в зоне пика, что не позволяет судить об амплитуде в резонансе, однако значение резонансной частоты можно определить с погрешностью $\varepsilon < 1\%$.

Результаты экспериментов. Исходя из полученных АЧХ для различных значений усилия затяжки $F_{зат}$, можно судить о том, что гистерезис при увеличении и уменьшении частоты возбуждающего воздействия либо отсутствует,

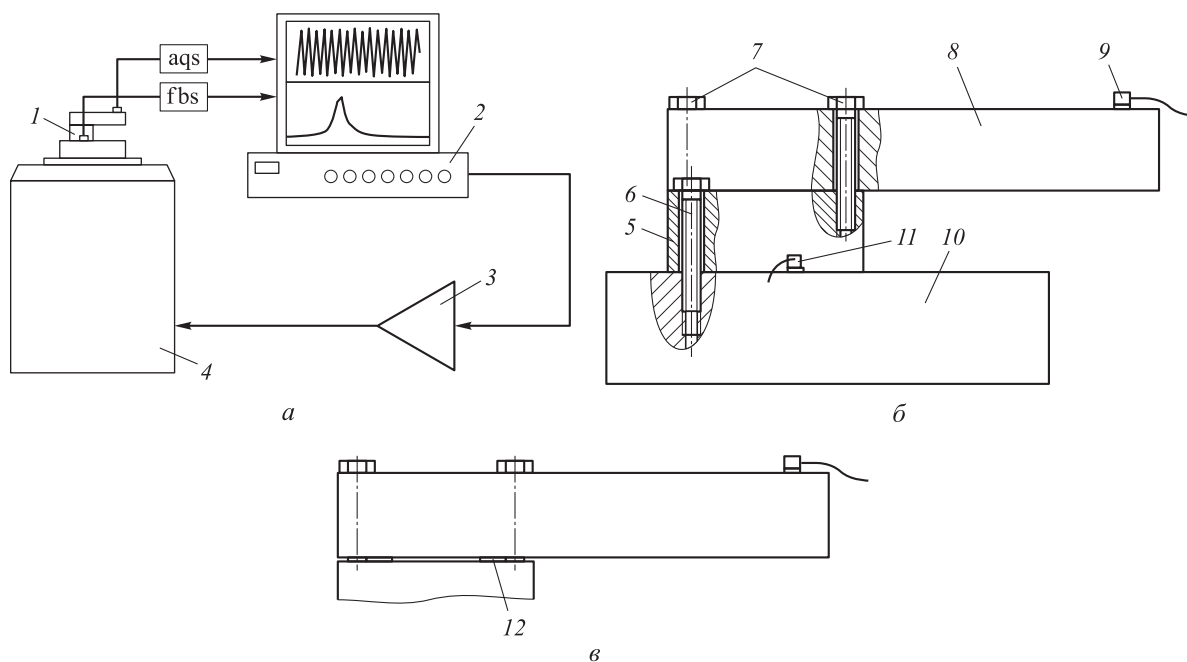


Рис. 2. Схемы экспериментальной установки (а) и исследуемого образца без ОП (б) и с ОП (в): 1 — образец для испытаний; 2 — система управления виброплатформой и сбора данных; 3 — усилитель; 4 — виброплатформа; 5 — основание; 6 и 7 — болты для закрепления основания и балки; 8 — балка; 9 — акселерометр, выполняющий роль датчика; 10 — переходная пластина; 11 — датчик обратной связи; 12 — подкладные пластины; aqs — записываемый сигнал; fbs — сигнал обратной связи

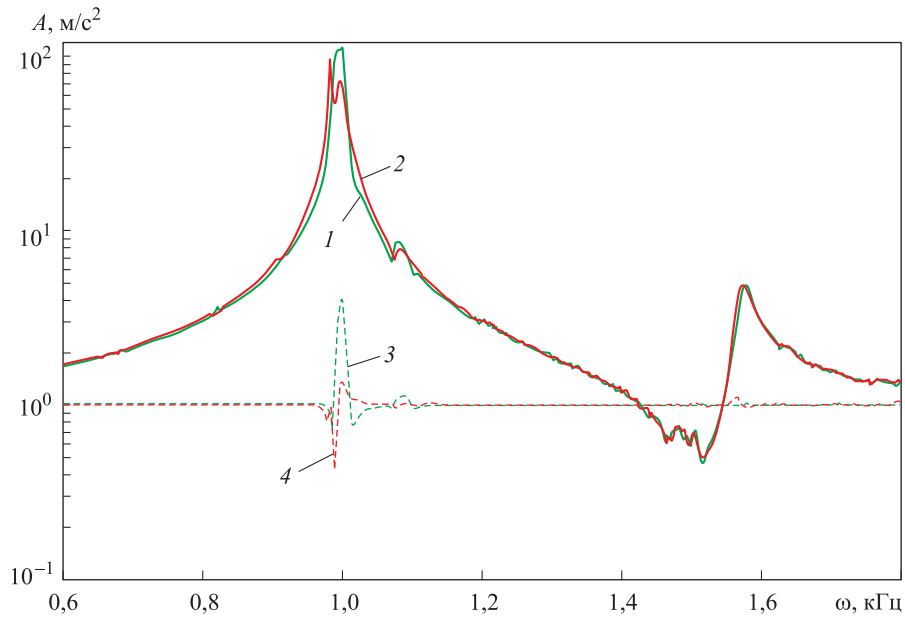


Рис. 2. Пример АЧХ при моменте затяжки $T_{\text{зат}} = 1$ Н·м:
1 и 2 — спектр сигнала отклика при прямом и обратном проходе;
3 и 4 — спектр сигнала возбуждения при прямом и обратном проходе

либо не превышает погрешности метода проведения исследования, т. е. $\varepsilon < 10\%$. Это позволяет считать систему линейной при условии, что $F_{\text{зат}} \gg F_{\text{возб}}$, где $F_{\text{возб}}$ — возбуждающая сила.

По АЧХ построены графические зависимости резонансной частоты от момента затяжки болтов для двух случаев: при контакте по всей поверхности (при отсутствии ОП) и по торцам ОП (рис. 4). Согласно этим зависимостям, частота резонанса сборных узлов повышается с ростом момента затяжки болтов. При контакте

по торцам ОП резонансная частота примерно на 150 Гц меньше, чем при контакте по всей поверхности. Это можно объяснить тем, что в эксперименте ОП моделировались дополнительными пластинами, в результате чего появлялся дополнительный стык, суммарно снижавший жесткость всего резьбового соединения. Также из рис. 4 следует, что при уменьшении ширины ОП максимальное значение резонансной частоты достигается быстрее, однако само максимальное значение растет с увеличением ширины ОП.

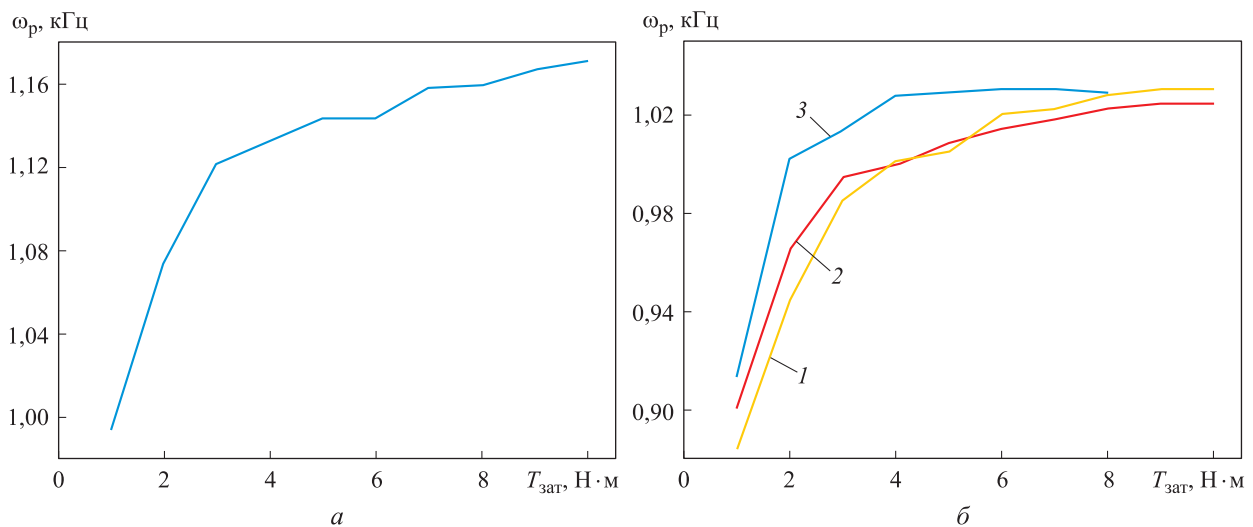


Рис. 3. Зависимости резонансной частоты ω_p от момента затяжки болтов $T_{\text{зат}}$ при контакте:
а — по всей поверхности; б — по торцам ОП шириной 7 (1), 10 (2) и 15 мм (3)

Выводы

1. Несмотря на нелинейный характер восстанавливающей силы, колебания изделий с резьбовыми соединениями можно считать линейными при условии, что внешняя переменная нагрузка меньше, чем усилие затяжки $F_{зат}$, т. е. можно говорить о собственных частотах при таком $F_{зат}$.

2. С ростом усилия затяжки собственная частота сборной конструкции растет до определенного значения. При дальнейшем повышении

$F_{зат}$ существенного возрастания собственной частоты не наблюдается (т. е. закон увеличения резонансной частоты близок к экспоненциальному). В этом случае максимальной собственной частотой является ее значение при абсолютно жестком стыке. Однако достигается оно при давлении на несколько порядков большем, чем обеспечиваемое в резьбовых соединениях.

3. В случае контакта соединяемых деталей по торцам ОП с повышением усилия затяжки при меньшей ширине ОП собственная частота растет быстрее, чем при большей ширине ОП.

Литература

- [1] Колоскова А.В., Киселев И.А., Иванов И.И. Моделирование динамики процесса точения с учетом податливости обрабатываемой детали. *Интернет-журнал «Науковедение»*, 2017, т. 9, № 2, 70 с. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/36TVN217.pdf> (дата обращения 15 апреля 2018).
- [2] Ito Y. *Modular design for machine tools*. New York, McGraw Hill Professional, 2008. 504 p.
- [3] Guo T., Li L., Cai L., Zhao Y. Alternative method for identification of the dynamic properties of bolted joints. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, no. 26 (10), pp. 3017–3027.
- [4] Ahmadian H., Jalali H. Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, no. 21, pp. 1041–1050.
- [5] Соколов А.П., Щетинин В.Н., Першин А.Ю., Сапелкин А.С. Реверсивная многомасштабная гомогенизация физико-механических характеристик гетерогенных механических сред с использованием графоориентированного программного подхода. *Композиты и наноструктуры*, 2017, т. 9, № 3–4(35–36), с. 142–155.
- [6] Щетинин В.Н., Соколов А.П. Решение задачи идентификации упругих характеристик компонент изотропных композитных материалов. *Матер. XX Юбилейной междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным системам*, Алушта, 24–31 мая, Москва, Изд-во МАИ, 2017, с. 665–666.
- [7] Левина З.М., Решетов Д.Н. *Контактная жесткость машин*. Москва, Машиностроение, 1971. 264 с.
- [8] Рыжов Э.В. *Контактная жесткость деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1966. 196 с.
- [9] Иванов А.С., Измайлов В.В. Расчет контактной деформации при конструировании машин. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2006, № 8, с. 3–10.
- [10] Иванов А.С. Нормальная, угловая и касательная контактные жесткости плоского стыка. *Вестник машиностроения*, 2007, № 7, с. 34–37.
- [11] Иванов А.С., Руднев С.К., Ермолаев М.М. Исследования и расчет собственных частот колебаний резьбовых соединений. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2014, № 4, с. 425–432.
- [12] Ermolaev M.M. Taking account of the contact-layer pliability in end clip design. *Russian engineering research*, 2016, vol. 36, no. 5, pp. 355–359.
- [13] Бидерман В.Л. *Теория механических колебаний*. Москва, Ленанд, 2017. 416 с.
- [14] Воронов С.А., Киселев И.А. Нелинейные задачи динамики процессов резания. *Машиностроение и инженерное образование*, 2017, № 2(51), с. 9–23.
- [15] Nikolaev S., Voronov S., Kiselev I. Estimation of damping model correctness using experimental modal analysis. *Vibroengineering Procedia*, 2014, vol. 3, pp. 50–54.
- [16] Ewins D.J. *Modal testing: theory, practice and application*. John Wiley & Sons, 2009. 576 p.
- [17] Дунаев П.Ф., Леликов О.П. *Конструирование узлов и деталей машин*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 569 с.
- [18] Ряховский О.А., ред. *Детали машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 472 с.

References

- [1] Koloskova A.V., Kiselev I.A., Ivanov I.I. Modelirovanie dinamiki protsessa tocheniya s uchetom podatlivosti obrabatyvaemoy detali [Modeling of the turning process dynamics, taking into the account the compliance of the workpiece]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* [Internet-journal «Science of science»]. 2017, vol. 9, no. 2, 70 p. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/36TVN217.pdf> (accessed 15 April 2018).
- [2] Ito Y. *Modular design for machine tools*. New York, McGraw Hill Professional, 2008. 504 p.
- [3] Guo T., Li L., Cai L., Zhao Y. Alternative method for identification of the dynamic properties of bolted joints. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, no. 26 (10), pp. 3017–3027.
- [4] Ahmadian H., Jalali H. Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, no. 21, pp. 1041–1050.
- [5] Sokolov A.P., Shchetinin V.N., Pershin A.Yu., Sapelkin A.S. Reversivnaya mnogomasshtabnaya gomogenizatsiya fiziko-mekhanicheskikh harakteristik geterogennykh mekhanicheskikh sred s ispol'zovaniem grafoorientirovannogo programmnoy podhoda [Reversible multiscale homogenization of physical properties of heterogeneous medium using graph-based software engineering]. *Kompozity i nanostruktury* [Composites & nanostructures]. 2017, vol. 9, no. 3–4(35–36), pp. 142–155.
- [6] Shchetinin V.N., Sokolov A.P. Reshenie zadachi identifikatsii uprugih harakteristik komponent izotropnykh kompozitnykh materialov [Solution of the problem of identification of elastic characteristics of components of isotropic composite materials]. *Materialy 20 yubileynoy mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitel'noy mekhanike i sovremennym prikladnym sistemam* [Materials of the 20 anniversary international conference on computational mechanics and modern applied systems]. Alushta, 24–31 May, Moscow, MAI publ., 2017, pp. 665–666.
- [7] Levina Z.M., Reshetov D.N. *Kontaktnaya zhestkost' mashin* [Contact stiffness of machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1971. 264 p.
- [8] Ryzhov E.V. *Kontaktnaya zhestkost' detaley mashin* [Contact stiffness of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1966. 196 p.
- [9] Ivanov A.S., Izmaylov V.V. Raschet kontaktnoy deformatsii pri konstruirovanii mashin [Calculation of contact deformation in the design of machines]. *Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah* [Friction&Lubrication in Machines and Mechanisms]. 2006, no. 8, pp. 3–10.
- [10] Ivanov A.S. Normal'naya, uglovaya i kasatel'naya kontaktnye zhestkosti ploskogo styka [Normal, angular and tangent contact stiffness of the flat joint]. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research]. 2007, no. 7, pp. 34–37.
- [11] Ivanov A.S., Rudnev S.K., Ermolaev M.M. Issledovaniya i raschet sobstvennykh chastot kolebaniy rez'bovykh soedineniy [Research and calculation of natural vibration frequencies of threaded connections]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie* [Modern mechanical engineering. Science and education]. 2014, no. 4, pp. 425–432.
- [12] Ermolaev M.M. Taking account of the contact-layer pliability in end clip design. *Russian engineering reserch*, 2016, vol. 36, no. 5, pp. 355–359.
- [13] Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical oscillations]. Moscow, Lenand publ., 2017. 416 p.
- [14] Voronov S.A., Kiselev I.A. Nelineynye zadachi dinamiki protsessov rezaniya [Nonlinear Problems of Cutting Process Dynamics]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* [Mechanical engineering and engineering education]. 2017, no. 2(51), pp. 9–23.
- [15] Nikolaev S., Voronov S., Kiselev I. Estimation of damping model correctness using experimental modal analysis. *Vibroengineering Procedia*, 2014, vol. 3, pp. 50–54.
- [16] Ewins D.J. *Modal testing: theory, practice and application*. John Wiley & Sons, 2009. 576 p.
- [17] Dunaev P.F., Lelikov O.P. *Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin* [Design of units and machine parts]. Moscow, Bauman Press, 2017. 569 p.
- [18] *Detali mashin* [Details of machines]. Ed. Ryahovskiy O.A. Moscow, Bauman Press, 2014. 472 p.

Информация об авторе

КУЦ Михаил Сергеевич (Москва) — ассистент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kuts@bmstu.ru).

Information about the author

KUTS Mikhail Sergeevich (Moscow) — Teaching Assistant, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kuts@bmstu.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Куц М.С. Экспериментальное исследование влияния усилия затяжки болтов на резонансные частоты консолюно закрепленной балки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 9, с. 37–43, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-37-43.

Please cite this article in English as:

Kuts M.S. An Experimental Study of the Effect of Screw Tightening on the Resonance Frequencies of a Cantilever Beam. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 9, pp. 37–43, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-37-43.



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
А.А. Гурова, П.В. Слитикова, Ж.Н. Медных
«Химия: теория и практика.
Свойства металлов»

Учебник является оригинальным изданием и не имеет аналогов среди литературы по химии, используемой в учебном процессе технических университетов и вузов. По содержанию и структуре книга представляет собой совокупность учебника, задачника и практикума и состоит из трех разделов. Первый посвящен современным вопросам классификации, строения, получения и очистки металлов. Во втором разделе рассмотрены основные физические и химические свойства металлов. Третий раздел содержит материал, охватывающий сплавы и растворы в металлических системах.

Материал учебника изложен в доступной, но в тоже время достаточно строгой форме. Некоторые темы в нем освещены более глубоко, чем в существующих учебниках, и, главное, методически удачнее. Приведенные на форзацах современные формы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева отражают существование и проблемы их классификации и синтеза. Указана коррозионная стойкость большинства металлов, которая является одним из важнейших требований, предъявляемых к конструкционным металлическим материалам. Периодические системы с такой информацией в современных учебниках практически не приводились.

Учебник соответствует государственному образовательному стандарту по химии для технических направлений и специальностей и предназначен для студентов 1-3-го курсов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru