



УДК 621.8

**В.Г. Артюх, Н.В. Корихин,
Н.В. Чернышева, И.Н. Чигарева, А.И. Круглов**
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: artiukh@mail.ru
Дата поступления 23.12.2022
В авторской редакции

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ МАШИН И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАБЛУЖДЕНИЯ, С НЕЙ СВЯЗАННЫЕ

Аннотация

Рассматриваются основные технические заблуждения, вызванные непониманием характера и величин внешних нагрузок, приложенных к деталям машин, а также самого понятия «прочность». Исследуется зависимость коэффициента запаса прочности детали машины от параметров силовой линии, в которую установлена данная деталь. Выясняются отличия проектной и функциональной прочности и пути ее повышения.

Ключевые слова: проектная и функциональная прочность, коэффициент запаса прочности, материал, деталь, машина, сооружение.

Введение

На сегодняшний день, к сожалению, в вопросах исследования (с инженерной точки зрения) прочности материалов и деталей машин накопилось множество технических заблуждений, вызванных как непониманием характера и величин внешних нагрузок, приложенных к деталям машин, так и нечеткостью самого понятия «прочность». Это непонимание особенно сильно у инженеров-механиков, эксплуатирующих металлургическое оборудование, но присутствует также и в среде вузовских преподавателей, готовящих будущих инженеров.

Основная часть

Вопросы классификации и возникновения внешних нагрузок, воздействующих на детали металлургических машин, рассмотрены довольно подробно в работах [1-5]. С понятием «прочность», а точнее, с термином «прочность» мы встречаемся очень часто, как в повседневной практике, так и в специализированной технической литературе [6-9]. Тем не менее, это понятие требует уточнения, ибо под прочностью понимают разные свойства тел или материалов. Ясно, что без четкого определения понятия

прочности нельзя анализировать варианты повышения прочности или определения оптимальной прочности. Нужно разобраться и в том, что является объектом понятия «прочность»: материал, деталь, машина, сооружение – другими словами, прежде всего хотелось бы знать, о прочности чего идет речь [1, 10].

Все мы в свое время учились по классическим советским учебникам металлургического оборудования, например: Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. «Машины и агрегаты металлургических заводов», в 3-х томах; Королев А.А. «Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков». Что же рекомендуют эти учебники при проектировании деталей металлургических машин? «Допустимые напряжения в валках принимают, исходя из пятикратного запаса прочности их». Для шпинделей привода прокатных валков, нажимных винтов также рекомендован пятикратный запас прочности. Для станин клетей прокатных станков рекомендован десятикратный запас прочности.

Результаты такого проектирования мы видим на рисунках 1-4. Поломок не просто много. Их очень много. Чистовая группа клетей непрерывного широкополосного стана (НШС) 1700 комбината Arcelor

Mittal Temirtau – 50 поломок подшипников рабочих валков в месяц. Число поломок во всех клетях черновой и чистовой группы НШС 1700 ПАО «ММК им. Ильича» за 3 года – 261. Убытки одного металлургического комбината за год только от разрушения деталей механического оборудования – миллиарды рублей. Станины клетей про-

катных станов не разрушаются, но пластически деформируются («разбиваются») под наделками, что вызывает необходимость их наплавки и дорогостоящей мехобработки. Все говорит о том, что есть системное непонимание происходящих при нагружении процессов, и простым увеличением коэффициента запаса прочности эту проблему не решить.



а) разрушение бочки валка от изгиба и приводного конца от кручения



б) разрушение лопасти хвостовика валковой муфты от изгиба и сдвига

Рисунок 1. Рабочие валки и валковые муфты НШС 1700 ПАО «ММК им. Ильича»



а) разрушение шпинделя привода рабочих валков по головке (шарнир Гука)



б) «разбивание» и выкрашивание наделок подушек рабочих валков

Рисунок 2. Шпиндель привода и подушка рабочего валка стана 3000 ПАО «ММК им. Ильича»



Рисунок 3. Хобот завалочной машины мартеновского цеха



Рисунок 4. Брехшпиндель пильгерстана 6÷12" (усталостная трещина, косой излом)

Зададим два классических русских вопроса (по Герцену и Чернышевскому): **кто виноват** в сложившейся ситуации, и **что делать** инженерам-механикам?

На вопрос «кто виноват?» существует три ответа:

1. Непонимание того, с какими нагрузками нужно бороться.
2. Понятие «заданные нагрузки».
3. Коэффициент запаса прочности детали = const.

Пункт 1 подробно рассмотрен в монографии [1]. Из спектра всех нагрузок нужно выделить технологические (полезные), которые изменять нельзя, и нетехнологические (паразитные), которые можно и нужно уменьшать путем амортизации.

Пункт 2 не менее подробно рассмотрен в работах [4, 10]. Не существует заранее заданных нагрузок. Есть заданные воздействия. Нагрузки не заданы «свыше», а возникают в самой машине под влиянием этих воздействий. Величина нагрузок всегда зависит от параметров машины - жесткости и энергоемкости. Если мы хотим уменьшить возникающие в системе нагрузки, то мы должны увеличивать энергоемкость (резильянс) этой системы, и уменьшать ее жесткость.

Пункт 3 попытаемся рассмотреть прямо сейчас.

Основные технические заблуждения, порождаемые разными (нечеткими, неточными) определениями прочности:

1. Чем больше деталь, тем она прочнее.
2. Чем прочнее материал детали, тем прочнее сама деталь.
3. Чем прочнее деталь, тем она долговечнее.
4. Динамические нагрузки опаснее статических.

«Чем больше деталь, тем она прочнее». Это практическая реализация народной мудрости «где тонко, там и рвется». Даже в статике такое утверждение верно не всегда. Вавилонская башня рухнула не из-за смещения языков строителей, а от достижения каменной кладкой своей предельной высоты, после чего она разрушается под

действием собственного веса. При увеличении размеров детали (кручение, изгиб) прочность растёт пропорционально третьей степени линейного размера (моменты сопротивления: полярный и осевой), а жесткость – пропорционально четвертой степени того же размера (моменты инерции: полярный и осевой). В статически неопределимых системах более жесткие элементы автоматически принимают на себя большую часть нагрузки, т.е. прочность в них зависит от жесткости. Поэтому очень часто «рвется там, где толсто». В динамике от жесткости зависит коэффициент динамичности, и вся дополнительная прочность, полученная нами в статике от увеличения размеров детали, может быть «съедена» возросшим коэффициентом динамичности. Увеличение размеров детали при колебательных процессах влечет за собой увеличение массы и, соответственно, увеличение инерционных нагрузок. Если «где тонко» – это концентратор напряжений (например, проточка или трещина), то в этом месте еще и полностью меняется напряженное состояние материала детали. И таких примеров можно привести великое множество.

«Чем прочнее материал детали, тем прочнее сама деталь». Действительно, если бы такой связи не было, то зачем были бы нужны прочные материалы? Ведь целые коллективы ученых и инженеров создают новые сплавы, полимеры, композитные материалы, а также применяют новые виды их термических и механических обработок – и все для того, чтобы получить еще более прочные материалы, чем те, которые уже применяются. Вместе с тем, практика эксплуатации металлургических машин знает много примеров противоположных, когда изготовление детали из менее прочного материала делает деталь более прочной. Такая деталь выдерживает большую разрушающую нагрузку, а значит, имеет большую прочность.

Различие в том, **что** принято считать мерой прочности. В одних случаях мерой прочности считают предельные напряжения, в других – мерой прочности является предельная разрушающая нагрузка. В чем

главная разница между предельной нагрузкой и предельным напряжением? Предельная нагрузка – величина интегральная, а предельное напряжение – дифференциальная. Соответствие этих величин зависит от первоначального (в упругой стадии работы конструкции) и конечного (предшествующего разрушению) распределения напряжений. Большая прочность **детали** может быть достигнута при меньшей прочности (но более высокой пластичности) **материала**. Это объясняется более равномерным распределением напряжений в предельной стадии нагружения, предшествующей разрушению. Практика эксплуатации некруглых валов металлургических машин (трефовые соединения в приводах прокатных станов) не только полностью подтверждает это, но и указывает реальный путь повышения прочности валов и преодоления сложившихся заблуждений.

«Чем прочнее деталь, тем она долговечнее». Такое утверждение представляется совершенно очевидным, поэтому необъяснимыми кажутся случаи, когда оно оказывается неверным. Рассмотрим пример из практики эксплуатации металлургических машин. На рабочие валки, их подушки и, соответственно, на станины рабочих клеток при захвате металла валками действуют значительные нагрузки горизонтального направления [11]. Результат такого воздействия – «разбивание» станин, подушек и их защитных лицевых планок. Практика эксплуатации указанных узлов и деталей знает много попыток увеличить прочность упомянутых лицевых планок. Подавляющее большинство этих попыток нужно признать неудачными. Несмотря на существенное повышение прочности планок, их долговечность практически не возросла.

Единственной удачной попыткой следует считать применение полимерных планок (например, французских полиэтиленовых планок «Klessim»), срок службы которых на чистовых клетях НШС-1700 ММК им. Ильича достиг 24 мес. по сравнению с 6...10 мес. для различных вариантов стальных планок. Попытка объяснить этот результат показала, что прочность полимерной планки (найденная экспериментальным путем) примерно на порядок меньше,

чем планки стальной. Возникает парадоксальная ситуация, когда слабая деталь оказывается более долговечной, то есть лучше выполняющей свои функции [12-15]. Такая деталь **функционально** является более прочной; именно так трактует прочность и обслуживающий персонал машин.

«Динамические нагрузки опаснее статических». Это утверждение напоминает старый армейский анекдот: «Товарищ прапорщик, что тяжелее – килограмм пуха или килограмм гвоздей?». Если в детали будет достигнуто разрушающее напряжение – она разрушится. И совершенно все равно – было это статическое напряжение или динамическое. Другое дело, что при динамическом воздействии на систему гораздо легче получить большую локальную силу. Ведь в динамике величина генерируемой при внешнем воздействии нагрузки зависит от параметров воспринимающей это воздействие системы (жесткости и энергоемкости). Чем жестче система, тем большую нагрузку мы получим при том же воздействии. Именно поэтому мы бьем по гвоздю молотком, а не просто давим на него.

Амортизация – это изменение параметров упругой системы таким образом, чтобы при неизменном внешнем воздействии в ней возникали нагрузки меньшего уровня (безопасного с точки зрения прочности). Поскольку все металлургическое оборудование выполнено в основном из стали (а это материал очень жесткий), то без специальных методов уменьшения жесткости и увеличения энергоемкости (амортизации) возникающие при динамическом воздействии (т.е. воздействии энергией) нагрузки будут очень большими. Это и создает впечатление какой-то особой опасности именно динамических нагрузок. Осознать это возможно только в случае отказа от понятия «заданные нагрузки» (для всех воздействий, кроме статического) и замены его понятием «возникающие в данной системе нагрузки». Именно «в данной системе», так как системы с различными жесткостью и энергоемкостью будут при **одном и том же** воздействии генерировать совершенно **разные** нагрузки.

Все вышеизложенное требует нового подхода к самому определению прочности.

Сформулируем следующее определение. «**Функциональная прочность** детали (работающей в конкретной машине) – это способность данной детали выполнять свои функции, не разрушаясь». Такое определение кажется логичным и понятным. Правда, не совсем ясно, зачем нужно вводить это новое определение, если старые были похожими.

Дело в том, что предыдущие определения вовсе не были аналогичными данному. Прочность связывалась либо с величиной максимального напряжения, либо со способностью воспринимать нагрузки, не разрушаясь. Теперь она связывается со способностью детали выполнять свои функции, не разрушаясь. На первый взгляд кажется, что второе и третье определения идентичны – в одном случае говорится о способности воспринимать нагрузки, а в другом – о способности детали выполнять свои функции. Ведь при выполнении любых функций детали тоже приходится воспринимать какие-то нагрузки.

Разница становится понятной, если вспомнить, что нагрузки могут быть полезными (технологическими) и вредными (паразитными), с которыми надо бороться. При этом паразитные нагрузки в подавляющем большинстве случаев являются следствием воздействия на машину (или отдельные ее узлы) энергией или деформацией [4]. В этом случае генерируемые нагрузки зависят не только от величины воздействия извне, но и от параметров самой воспринимающей это воздействие системы, т.е. машины. Другими словами, каждая деталь машины участвует в формировании нагрузок, причем некоторые из этих деталей (так называемые «активные детали» [3]) оказывают на уровень паразитных нагрузок весьма существенное влияние. Эти детали отличаются от других повышенной энергоемкостью и малой жесткостью. Замена такой детали другой деталью может изменить энергетические характеристики всего привода, а, следовательно, повлиять на уровень нагрузок в машине.

Когда мы сравниваем прочность двух взаимозаменяемых деталей, работающих поочередно в одной и той же машине, то говорим, что ставим их в равные условия

работы. При этом подразумевается, что равные условия работы означают равные нагрузки на эти детали. Однако такой вариант крайне редок. Так бывает либо при нагружении статической силой, либо в случае, когда заменяемые детали совпадают с новыми деталями по всем энергетическим параметрам – в этом случае генерирование нагрузок в машине и ее узлах происходит так же, как и до замены, и величины нагрузок на сравниваемые детали будут одинаковыми. При этом можно сказать, что функциональная прочность таких деталей равна их проектной прочности.

Если это условие выполняется для всех деталей, которые мы пробуем установить в машине, то эффективность такой машины близка к идеальной. Но в большинстве случаев это не так. Пусть речь идет о таких деталях привода, как муфты (например, муфты привода прокатного стана). Среди них можно выделить несколько типов муфт, которые отличаются друг от друга принципиально, то есть имеют существенно различную рабочую характеристику. Это муфты жесткие, компенсирующие, упругие и т.д. Если подбор муфты для привода будет выполняться только по ее прочности, то получим приводы с муфтами различной функциональной прочности. Это будут приводы с различными нагрузками (при одних и тех же внешних воздействиях). Ярким примером могут служить приводы черновых клетей НШС. Запись нагрузок в приводе свидетельствует о высокой динамичности, а, следовательно, о недостаточной функциональной прочности деталей главной линии. Замена в приводе быстроходного вала с зубчатой муфтой (МЗП) на упругий энергоемкий вал-энергоаккумулятор позволит значительно, в 2...3 раза, уменьшить динамическую (паразитную) составляющую момента в главной линии, и тем самым увеличить функциональную прочность **всех** деталей главной линии [16].

Приведем еще один пример. Горизонтальный удар подушки нижнего рабочего вала о станину черновой клетки толстолистового стана 3000, возникающий при захвате металла прокатными валками.

При замене стальных планок-наделок на полиуретановые произошло изменение функциональной прочности деталей горизонтальной силовой линии:

при $\Delta = 1\text{ мм}$ запас прочности возрастает в $2,6/2,1 = 1,24$ раза;

при $\Delta = 2\text{ мм}$ запас прочности возрастает в $2,8/2,2 = 1,30$ раза;

при $\Delta = 6\text{ мм}$ запас прочности возрастает в $3,5/2,25 = 1,55$ раза,

причем это увеличение наблюдается для **всех** деталей горизонтальной силовой линии.

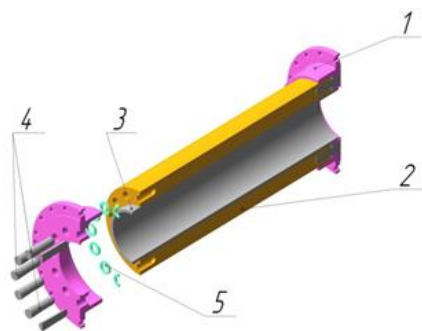


Рисунок 5. Устройство вала-энергоаккумулятора

1 – полумуфта; 2 – полиуретановый упругий элемент; 3 – труба центрирующая; 4 – палец; 5 – гайка

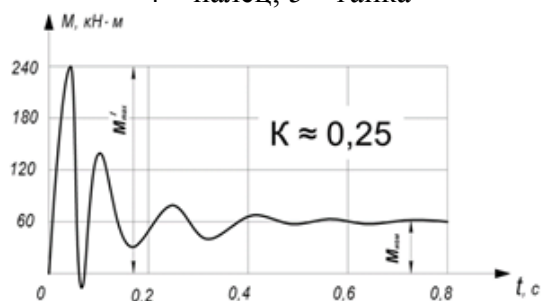


Рисунок 6. Момент сил упругости на быстроходном валу черновой прокатной клетки №4а НШС 1700 ПАО «ММК им. Ильича». Качество силовой линии $K \approx 0,25$

Между проектной и функциональной прочностью нет ни прямой, ни обратной зависимости. В связи с этим возникает вопрос: как определять и в чем измерять функциональную прочность? На первом этапе, при силовом и энергетическом анализе машины, можно оперировать понятием «функциональная прочность» на качественном уровне, рассматривая эффективные пути ее повышения. При этом надо

иметь в виду, что понятие «функциональная прочность» (в отличие от понятия «прочность») относится не к данной детали вообще, а к данной детали, работающей в данной машине и в данном режиме. Это понятие не может существовать вне работающей машины. Отсюда следует, что определенная деталь, обладающая вполне определенной и экспериментально подтвержденной прочностью, может иметь различную функциональную прочность в зависимости от того, куда, в какой привод или упругую систему она установлена. То есть, коэффициент запаса прочности = var. Он равен

$$n_{\phi} = F^*/F_{\max}, \quad (2)$$

где $F^* = \text{const}$ – разрушающая нагрузка для данной детали;

$F_{\max} = \text{var}$ – максимальная нагрузка, действующая на данную деталь в данной машине.

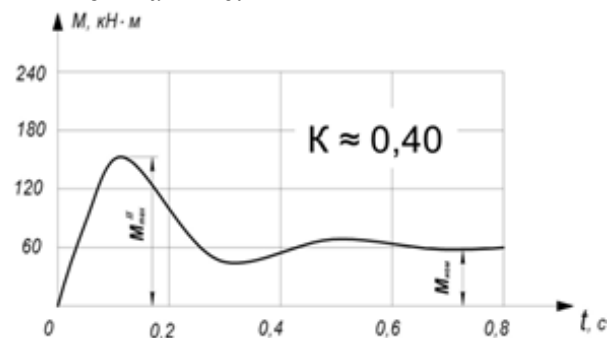


Рисунок 7. Момент сил упругости на быстроходном валу после установки полиуретанового упругого вала-энергоаккумулятора. Качество силовой линии $K \approx 0,4$

Это и есть численное выражение функциональной прочности.

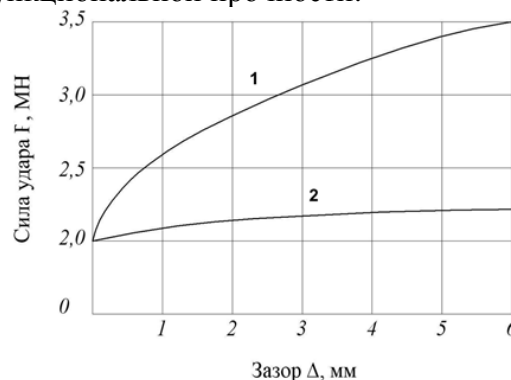


Рисунок 8. Зависимость силы удара от величины зазора: 1 – лицевые планки из стали 45; 2 – лицевые планки из полиуретана adiprene L167

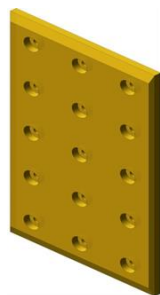


Рисунок 9. Полиуретановая лицевая планка

Таким образом, анализ уровня функциональной прочности деталей в машине поможет более эффективно проектировать и совершенствовать машины, причем мерой такой эффективности может служить различие между проектной и функциональной прочностью, т.е. между коэффициентом запаса прочности детали, определенным при проектировании, и коэффициентом запаса прочности данной детали в данной машине.

Заключение

1. Коэффициент запаса прочности детали машины не является постоянной величиной. Это величина переменная, причем зависит она от параметров силовой линии, в которую установлена данная деталь.
2. Функциональная прочность детали численно представляет собой запас прочности данной детали в данной машине.
3. Понятие «функциональная прочность» и анализ уровня функциональной прочности деталей в машинах поможет более эффективно проектировать и совершенствовать машины, причем мерой такой эффективности может служить различие между проектной и функциональной прочностью.

Исследование частично финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы Исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (соглашение №075-15-2020-311 от 20.04.2022).

Библиографический список

1. Артюх В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах: монография / Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2008. 246 с. ISBN 966-604-011-5

2. Эксплуатация и ремонт механического оборудования промышленных предприятий / Кравченко В.М., Ищенко А.А., Артюх В.Г., Сидоров В.А. Запорожье: издатель ФООП Мокшанов В.В., 2021. 316 с. ISBN 978-617-7520-84-8
3. Концепция активной детали в механическом оборудовании / Артюх В.Г., Корихин Н.В., Чернышева Н.В., Чigareва И.Н. // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 24(67). С.81-90.
4. Gharaibeh Nabeel S., Matarneh Mohammed I., Artyukh V.G. Loading Decrease in Metallurgical Machines. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, no.8(12), 1461–1464 (2014).
5. Sorochan E., Artiukh V., Melnikov B., Raimberdiyev T. Mathematical Model of Plates and Strips Rolling for Calculation of Energy Power Parameters and Dynamic Loads. MATEC Web of Conferences, vol.73, 04009 (2016). doi: 10.1051/mateconf/20167304009
6. Mazur V., Artyukh V., Artyukh G., Takadzhi M. Current Views on the Detailed Design of Heavily Loaded Components for Rolling Mills. (2012) Engineering Designer, 2012, V.37, No.1, pp. 26–29.
7. Ischenko A.O., Kravchenko V.M., Dashko O.V., Kakareka D.V. Novie tehnologii vosstanovlenia i zaschiti silovogo oborudovania s pomoschiu kompozitnih materialov [New technologies for restoration and protection of power equipment with the aid of composite materials]. Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 2017, vol. 60(2), pp. 159–166.
8. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices. CIS Iron and Steel Review, 2019, no. 18, pp. 30-34. doi: 10.17580/cisisr.2019.02.06
9. Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Sotnikov A.L. Vlianie schem shtampovki zagotovok koles na regimi moschnosti stamповochnogo pressa i na iznos stamповochnogo instrumenta [Influence of wheel billet stamping schemes on power modes

- of forming press operation and on wear of the deformation tool]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*, 2018, vol. 61(5), pp. 385-392. doi: 10.17073/0368-0797-2018-5-385-392
10. Артюх В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок: монография / Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. 288с. ISBN 978-617-7295-00-5
 11. Mazur V., Artiukh V., Ishchenko A., Laktionova Y., Zotkina N. Theoretical Calculations and Study of Horizontal Forces Acting on 4-Hi Sheet Stands During Rolling. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 983, pp. 511-521. doi: 10.1007/978-3-030-19868-8_50
 12. Al-Quran Firas M.F., Matarneh M.E., Artukh V.G. Choice of Elastomeric Material for Buffer Devices of Metallurgical Equipment. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, no.4(11), pp. 1585–1589 (2012).
 13. Artiukh V.G., Karlushin S.Yu., Sorochan E.N. Peculiarities of Mechanical Characteristics of Contemporary Polyurethane Elastomers. *Procedia Engineering*, 2015, no.117, pp. 938–944. doi: 10.1016/j.pro-eng.2015.08.180
 14. Artiukh V., Mazur V, Kargin S., Zakharova L. Adapters for metallurgical equipment. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 170, 03028. doi: 10.1051/mateconf/201817003028
 15. Artiukh V.G., Galikhanova E.A., Mazur V.M., Kargin S.B. Energy intensity of parts made from polyurethane elastomers. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, 81(5), pp. 102-115. doi: 10.18720/MCE.81.11
 16. Варианты защиты металлургического оборудования от поломок в условиях импортозамещения и недостаточного финансирования / Артюх В.Г., Корихин Н.В., Чернышева Н.В., Чigareва И.Н. // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXII Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 / под ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2021. С.225-232.*

Information about the paper in English

V.G. Artyukh, N.V. Korikhin, N.V. Chernysheva, I.N. Chigareva, A.I. Kruglov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Saint Petersburg, Russia

E-mail: artiukh@mail.ru

Receipt date: December 23, 2022

FUNCTIONAL STRENGTH OF MACHINES AND MAIN RELEVANT MISLEADING TECHNICAL BELIEFS

Abstract

The paper describes main misleading technical beliefs resulting from misunderstanding of the nature and values of external loads applied to machine parts, and the concept of strength. There is a study on the dependence between the safety factor of a machine part and force line parameters of such part. The paper identifies differences between design and functional strength and methods used for its increase.

Keywords: design and functional strength, safety factor, materials, part, machine, construction.
