

УДК 621.9.06; 621.7.07

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

В.В. Ерохин

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

Рассматривается взаимосвязь эксплуатационных свойств станочного приспособления между собой. Определены качественные взаимосвязи между эксплуатационными свойствами для решения оптимизационной задачи выбора или проектирования станочного приспособления с заданной функциональностью и долговечностью. Решение оптимизационной задачи проектирования станочного приспособления представлено относительно таких эксплуатационных свойств как прочность, контактная прочность, усталостная прочность, жесткость, контактная жесткость, износостойкость, фреттингостойкость, трение, виброустойчивость, зажимная способность, постоянство размеров (рассмотрение ведется с позиций релаксации и ползучести материала). Определено влияние легирования материала деталей станочного приспособления на повышение его прочности.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, станочные приспособления, качество.

Введение. Функциональность и долговечность станочного приспособления (СП) определяются его конструктивным исполнением и стабильностью требуемых показателей эксплуатационных свойств. Назначение на функциональные поверхности деталей СП физико-механических, химических, геометрических параметров, определяющих требуемые эксплуатационные свойства СП, является общемашиностроительной проблемой. Решение этой проблемы должно строиться на комплексном и системном рассмотрении всех взаимосвязанных и невзаимосвязанных влияний эксплуатационных свойств друг на друга и на качество СП и его деталей.

Основными эксплуатационными свойствами СП являются: прочность, контактная прочность, усталостная прочность, жесткость, контактная жесткость, износостойкость, фреттингостойкость, трение, виброустойчивость, зажимная способность, постоянство размеров.

Основная часть. Взаимосвязь эксплуатационных свойств СП между собой (табл. 1) приводит к решению многокритериальных оптимизационных задач [1].

Таблица 1

Взаимосвязь эксплуатационных свойств СП между собой

	Пр	КПр	УПр	Жс	КЖс	Из	ФС	Тр	ВУ	ЗС	ПР
Пр	–	да*	да	да	да	да	да	да	да	да	да
КПр	да	–	да	да	да	да	да	да	да	да	нет
УПр	да	да	–	да	да	да	да	да	да	да	да
Жс	да	да	да	–	да	да	да	да	да	нет	да
КЖс	да	да	да	да	–	да	да	да	да	да	нет
Из	да	да	да	да	да	–	да	да	да	да	нет
ФС	да	да	да	да	да	да	–	да	да	да	нет
Тр	да	да	да	да	да	да	да	–	да	да	да
ВУ	да	да	да	да	да	да	да	да	–	да	да
ЗС	да	да	да	нет	да	да	да	да	да	–	да
ПР	да	нет	да	да	нет	нет	нет	да	да	да	–

Примечания: *«да» или «нет» – взаимосвязь между эксплуатационными свойствами соответственно имеется или не имеется; Пр – прочность; КПр – контактная прочность; УПр – усталостная прочность; Жс – жесткость; КЖс – контактная жесткость; Из – износостойкость; ФС – фреттингостойкость; Тр – трение; ВУ – виброустойчивость; ЗС – зажимная способность; ПР – постоянство размеров (рассмотрение ведется с позиций релаксации и ползучести материала).

Повышение или снижение прочности материала непосредственно влияет на контактную прочность через показатели: условный предел текучести и предел прочности при разрыве материала.

Взаимосвязь усталостной прочности поверхности и прочности детали СП выражаются через их зависимость от значений условного предела текучести, предела прочности, относительной предельной деформации материала до его разрыва, отношения предела прочности материала к условному пределу текучести.

Повышение прочности материала термообработкой неоднозначно влияет на усталостную прочность. Усталостная прочность материала поверхности детали СП снижается из-за повышения плотности дислокационных петель, но это повышает прочность материала. Увеличение плотности дислокационных петель приводит к увеличению модулей упругости первого и второго рода материала, критической плотности дислокаций при разрыве материала, а также к уменьшению полосы скольжения дислокаций, что значительно повышает усталостную прочность материала.

Легирование материала деталей СП такими материалами как хром, никель, марганец, углерод (для стали) повышает прочность СП. Но такое легирование не всегда повышает усталостную прочность материала. Увеличение относительной разности атомных радиусов атомов примеси и матрицы, концентрации атомов примеси повышает усталостную прочность. Из этого можно сделать вывод, что наибольшая усталостная прочность материала достигается за счет легирования железа углеродом и марганцем и снижается при легировании стали хромом. В качестве справочных данных приведем атомные радиусы материалов: железо – $r_a = 124,1 \cdot 10^{-12}$ м; углерод – $r_a = 77,2 \cdot 10^{-12}$ м; хром – $r_a = 124,9 \cdot 10^{-12}$ м; кремний – $r_a = 117,6 \cdot 10^{-12}$ м; марганец – $r_a = 136,7 \cdot 10^{-12}$ м.

Прочность и жесткость деталей СП, прочность и контактная жесткость поверхностей деталей СП взаимосвязаны между собой через параметры кристаллической решетки материала и плотности дислокационных петель. То есть повышение плотности дислокационных петель материала увеличивает параметры прочности материала – предел прочности на разрыв и условный предел текучести материала. Однако такое повышение увеличивает значения модулей упругости первого и второго рода материала, которые непосредственно определяют жесткость детали.

Прочность и износостойкость материала деталей СП взаимосвязаны между собой посредством параметров: предела прочности на разрыв, твердости поверхности и модуля упругости первого рода материала. Увеличение предела прочности на разрыв, модуля упругости первого рода материала повышает как прочность, так и износостойкость материала детали СП. Увеличение поверхностной твердости материала за счет поверхностного или локального термоупрочнения, нанесения твердых пленок не приводит к изменению общей прочности материала детали. Однако это не относится к объемным видам термоупрочнения.

Взаимосвязь прочности и фреттингостойкости определяется только условным пределом текучести материала. Повышение этого параметра определяет повышение прочности и фреттингостойкости материала деталей СП.

Прочность и трение имеют косвенную взаимосвязь через параметры: плотность дислокационных петель, условный предел текучести материала. Под трением здесь рассматривается его основной параметр – эффективный коэффициент трения скольжения. Как было показано выше – изменение плотности дислокационных петель непосредственно влияет на прочность материала. Также этот параметр и условный предел текучести материала через контактную жесткость влияет на амплитуду и частоту вибрационных колебаний контактов деталей СП, что непосредственно влияет на эффективный коэффициент трения.

Прочность деталей приспособления влияет на виброустойчивость следующим образом. Изменение прочности материала деталей СП термообработкой приводит к изменению плотности дислокационных петель и диаметра кристаллита материала. Изменение концентрации легирующих элементов материала не только меняет его прочность, но и температуру плавления, теплоемкость и теплопроводность материала, от которых зависит время релакса-

ции напряжений [2]. Такие изменения физико-химико-механических свойств непосредственно влияют на коэффициент внутреннего трения материала. Например, углерод, хром, марганец понижают время релаксации напряжений, что повышает коэффициент внутреннего трения материала. Но эти же легирующие элементы, в особенности углерод, снижают температуру плавления материала, которая прямо пропорционально влияет на коэффициент трения материала. Увеличение плотности дислокационных петель увеличивает модуль упругости второго рода материала, что снижает значение энергии, диссипацирующей за цикл колебания зоны контакта. Тем самым снижается виброустойчивость СП и увеличиваются вибрационные перемещения между деталями СП, а также между заготовкой и установочными опорами СП.

Зажимная способность взаимосвязана с прочностью только в условиях использования поводковой оснастки, поводковые элементы которой внедряются в поверхности других деталей СП или заготовку для их зажима либо передачи им движения.

Взаимосвязь прочности и постоянства размеров СП определяется химическим составом легирующих элементов материалов деталей СП. Легирующие элементы, повышающие теплоемкость и снижающие теплопроводность материала деталей СП, позволяют повысить стабильность во времени размеров деталей СП. К легирующим элементам повышающих стабильность размеров и прочность материалов деталей СП относятся хром, углерод и никель. Например, наибольшую релаксационную стойкость и механическую прочность обеспечивает сталь 40Х13.

Взаимосвязь между контактной и усталостной прочностью материала обуславливается прямо пропорциональной зависимостью. Повышение контактной прочности материала в той или иной степени повышает усталостную прочность и наоборот.

Контактная прочность материала и жесткость детали СП имеют взаимосвязь только, если модуль упругости материала имеет значение градиента распространения по объему детали близкого к нулю, что соответствует объемной термообработке детали СП. При поверхностном упрочнении материала деталей СП термообработкой, ППД или другими методами взаимосвязи между контактной прочностью материала и жесткостью детали СП нет.

Повышение контактной прочности через физико-механические параметры, такие как плотность дислокационных петель, условный предел текучести материала, приводит к увеличению контактной жесткости материала деталей СП.

Контактная прочность имеет взаимосвязь с износостойкостью и фреттингостойкостью материала аналогично взаимосвязи прочности с износостойкостью и фреттингостойкостью.

Влияние контактной прочности на трение и виброустойчивость аналогично влиянию прочности на трение и виброустойчивость. Однако это влияние особенно усиливается при поверхностном упрочнении функциональных поверхностей деталей СП.

Зажимная способность и контактная прочность определяются взаимосвязью через параметры: предел прочности материала при смятии и срезе. Контактное разрушение материала зажимных деталей СП обуславливает изменение формы их контакта с заготовкой и другими деталями СП. Однако это в основном происходит при не выдерживании требований теоремы Мелана об допустимых значениях контактных напряжений, не способствующих контактному разрушению.

Усталостная прочность поверхностей и жесткость деталей СП взаимно связываются между собой через модули упругости первого и второго рода, которые находятся в тесной зависимости от физико-химико-механических параметров: плотности дислокационных петель материала, концентрации примесей и легирующих элементов, типов легирующих элементов.

Основное влияние на усталостную прочность и контактную жесткость оказывают как физико-химико-механические параметры – условный предел текучести, остаточные напряжения в поверхностном слое, их знак, глубина и градиент распространения, модули упругости, плотность дислокационных петель материала, концентрация и типы легирующих элементов, – так и геометрические параметры качества контактируемых поверхностей деталей

СП. Наиболее сильная взаимосвязь этих эксплуатационных свойств относительно геометрических параметров качества проявляется через параметры шероховатости поверхности – R_p , R_{max} , t_m , S_m .

На взаимосвязь усталостной прочности с износостойкостью влияют параметры – поверхностная твердость, предел прочности при разрушении, остаточные напряжения в поверхностном слое, модуль упругости первого рода, относительная деформация при разрушении материала, R_a , t_m , S_m . При этом заметим, что износостойкость является «производной» от усталостной прочности, а повышение значения относительной деформации материала до его разрушения требует достаточно больших трудовых и материальных затрат на проведения специфических поверхностных или объемных видов упрочнений при достижении повышенных значений параметров прочности материала.

Усталостная прочность и фреттингостойкость аналогично связаны между собой, как и усталостная прочность с износостойкостью. Но здесь имеется обратная зависимость от условного предела текучести материала. Так, с повышением значения условного предела текучести материала фреттингостойкость повышается, но усталостная прочность понижается из-за снижения количества циклов нагружения зоны контактов, приводящих к разрушению материала.

При контакте твердых металлических соединений, особенно не гетерогенных сплавов, трение в основном определяется усталостным характером взаимодействия контактирующих поверхностей деталей СП. Тем самым взаимосвязь трения с усталостной прочностью материала существенна, особенно относительно таких параметров как поверхностная твердость, предел прочности, условный предел текучести, поверхностная энергия материала, R_a , t_m , S_m .

Взаимосвязь усталостной прочности с виброустойчивостью аналогично взаимосвязи прочности с виброустойчивостью. Но наибольшая взаимосвязь прослеживается относительно параметров – плотности дислокационных петель и размера кристаллита материала. Оптимальное управление указанными параметрами при достижении максимальной усталостной прочности и виброустойчивости носит противоречивый характер. Увеличение плотности дислокационных петель приводит к увеличению как усталостной прочности, так и виброустойчивости. Повышение значения размера кристаллита (зерна) наоборот повышает виброустойчивость и снижает усталостную прочность материала. Для управления этими параметрами разработаны достаточно много способов упрочнения поверхностей деталей СП, но наиболее надежным является термообработка, но он является и самым дорогостоящим. В этом случае необходимо дополнительно решать оптимизационную задачу относительно критерия надежности получения требуемых параметров при минимальной себестоимости, которая должна включать не только себестоимость изготовления детали СП, но и себестоимость эксплуатации и ремонта СП.

Усталостная прочность взаимосвязана с зажимной способностью подобно взаимосвязи контактной прочности с зажимной способностью.

Область взаимосвязи усталостной прочности с постоянством размеров деталей СП находится в использовании различного вида легирующих элементов. Например, углерод, хром и марганец существенно повышают усталостную прочность, но марганец существенно снижает релаксационную стойкость материала и тем самым постоянство размеров.

Жесткость и контактная жесткость, жесткость и износостойкость, жесткость и фреттингостойкость, жесткость и трение связаны между собой только параметрами прочности материала, и то, если градиент значений этих параметров по объему детали приближается к нулю. При увеличении жесткости материала детали наблюдается увеличение контактной жесткости, износостойкости, фреттингостойкости, а динамический коэффициент трения при циклическом нагружении зоны контакта деталей СП приближается к статическому коэффициенту трения. Повышение жесткости деталей СП благоприятно влияет на эксплуатационные характеристики СП, а также повышает точность обработки поверхностей заготовки.

Жесткость взаимосвязана с виброустойчивостью и постоянством размеров аналогично взаимосвязям прочности с виброустойчивостью и постоянством размеров.

На взаимосвязь контактной жесткости с износостойкостью и фреттингостойкостью существенное влияние оказывают [3] не только параметры прочности, но и особенно геометрические параметры качества поверхности – H_{max} (максимальное высотное значение макроотклонения в зоне контакта поверхностей деталей СП), Wz , Rp , Ra , tm , Sm . В этой взаимосвязи существует нелинейное влияние параметров Rp и Ra на указанные эксплуатационные свойства. Повышение значений Rp и Ra в определенном интервале повышают контактную жесткость и всегда снижают износостойкость, фреттингостойкость.

Параметр трения – эффективный коэффициент трения – является основным производным от контактной жесткости. Однако такая взаимосвязь имеет нелинейность. Повышение контактной жесткости обуславливает снижение амплитуды контактных колебаний, резонирующих колебаний с большими амплитудами, амплитуды колебаний зоны контакта от ударных нагрузок. Такое повышение несущественно снижает статический коэффициент трения скольжения.

Однако с повышением жесткости контакта увеличиваются собственные частоты колебаний зоны контакта. При прохождении резонирующей волны с более низкой по приоритету гармоникой колебания через контакт появляются трудно учитываемые резонирующие колебания большой энергии. Перераспределение энергии от высокочастотных колебаний в динамических системах является малоизученной научной проблемой, но это перераспределение в той или иной степени влияет на все эксплуатационные свойства, непосредственно определяемые прочностными параметрами.

Контактная жесткость взаимосвязана с виброустойчивостью также, как и прочность с виброустойчивостью.

Изменение контактной жесткости очень сильно влияет на изменение динамического коэффициента трения. Тем самым существует прямая взаимосвязь контактной жесткости с зажимной способностью приспособления. Однако это не касается зажимной способности поводковой оснастки, где зажим заготовки осуществляется внедрением в ее торец поводковых элементов.

Износостойкость, фреттингостойкость, трение, виброустойчивость и зажимная способность имеют между собой сильную взаимосвязь не только на уровне прочностных параметров поверхности, но и геометрических параметров качества контактируемых поверхностей, таких как H_{max} , Wz , Rp , Ra , tm , Sm . Повышение коэффициента трения в зоне контакта существенно повышает зажимную способность и виброустойчивость СП, но одновременно снижает износостойкость и фреттингостойкость. Виброустойчивость повышается в основном за счет диссипации колебательной энергии в зоне контакта, пропорционально зависящей от значения коэффициента трения скольжения. При этом следует заметить, что эти эксплуатационные свойства очень сильно зависят не только от метода получения детали, но и режимной части, особенно режимов механической обработки резанием.

Взаимосвязь трения и виброустойчивости с постоянством размеров необходимо рассматривать через параметры физико-химического строения структуры материала. В этом случае рассмотрение трения проводится относительно ее характеристики – внутреннего трения. Повышение внутреннего трения материала приводит к увеличению виброустойчивости СП и нестабильности размеров деталей СП из-за процесса ползучести материала. Основными параметрами внутреннего трения является время релаксации напряжений, плотность дислокационных петель и размер кристаллита материала. Повысить внутренне трение можно снижением времени релаксации напряжений, т.е. уменьшением значения теплоемкости и повышением значения теплопроводности материала. Также повышать внутреннее трение можно увеличением диаметра кристаллита и плотности дислокационных петель материала. Что же касается времени релаксации напряжений, то она управляется только выбором материала с соответствующим химическим составом. Размерами кристаллита и плотностью дислокационных петель материала наиболее эффективно управлять при различных видах упрочнения материала. Однако здесь существует неоднозначность – увеличение размера кристаллита материала сопровождается понижением плотности дислокационных петель. Такая неоднознач-

ность должна быть решена с помощью подбора оптимального технологического процесса упрочнения материала деталей СП.

Зажимная способность СП и постоянство размеров взаимосвязаны между собой через параметры процессов релаксации напряжений и ползучести материала. В этой взаимосвязи основным параметром является градиент релаксации напряжений в материале. Снижение значения градиента релаксации напряжения повышает зажимную способность материала СП, но это обстоятельство может как повысить, так и понизить ползучесть материала. В этом случае можно рекомендовать: поверхностно-пластическое деформирование без перенаклепа сталей кроме жаропрочных перлитного (25X2M1Ф), мартенситного (15X12BMФ), аустенитного (ХН35ВТ) классов, стали на никелевой основе (ХН70ВМЮТ, ХН70ВМТЮФ, ХН75ВМЮ), аустенитные и перлитные стали (15Г2СМФ, 30Х2ГМТ) повышают зажимную способность и постоянство размеров деталей СП.

Заключение. Исходя из рассмотренных взаимосвязей эксплуатационных свойств, можно сделать вывод: для проектирования СП с оптимальными параметрами качества необходимо решать многокритериальные оптимизационные задачи взаимосвязей эксплуатационных свойств относительно критериев: обеспечения требуемого качества обрабатываемой заготовки, требуемого межремонтного периода СП, минимальной себестоимости изготовления и эксплуатации СП.

Список литературы

1. Ерохин, В.В. Обеспечение качества станочных приспособлений: дис. ... доктора технических наук. – Брянск. 2007. – 412 с.
2. Ерохин, В.В. Влияние процесса релаксации напряжений на параметры станочных и контрольных приспособлений / В.В. Ерохин, В.В. Камынин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. - № 1. – С. 20-23.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Т.IV-3. Надежность машин / ред. совет: К.В. Фролов (пред.), В.В. Клюев, А.П. Гусенков, К.С. Колесников. – М.: Машиностроение, 1998. – 592 с.

Сведения об авторе

Ерохин Виктор Викторович - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизированные информационные системы и технологии» ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», erohinvv@mail.ru.

ENGINEERING OF SURFACES OF DETAILS OF MACHINE TOOL ADAPTATIONS

V. V. Erokhin

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

The interrelation of operational properties of the machine adaptation among themselves is considered. Qualitative interrelations between operational properties for the solution of an optimizing problem of a choice or design of the machine adaptation with the set functionality and durability are defined. The solution of an optimizing problem of design of the machine adaptation it is put concerning such operational properties as durability, contact durability, fatigue durability, rigidity, contact rigidity, wear resistance, a frettingostoykost, friction, vibrostability, tightening ability, constancy of the sizes (consideration is conducted with positions of a relaxation and creep of a material).

Keywords: *operational properties, machine adaptations, quality.*

References

1. Erokhin V.V. Ensuring the quality machine tool adaptations. Doct. Diss. (Engineering). Bryansk. 2007. 412 p.
2. Erokhin V.V., Kamynin V.V. The effect of stress relaxation on the parameters of machining and inspection tooling, *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015 , No.1, pp. 20-23.
3. Mechanical Engineering. Encyclopedia. T.IV-3. Reliability of machines / Ed. advice is K.V. Frolov (prev.), V.V. Klyuyev, A.P. Gusenkov, K.S. Kolesnikov. – M.: Mechanical Engineering, 1998. – 592 p.

Author' information

Viktor V. Erokhin - Doctor of Technical Sciences, Professor at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, erohinvv@mail.ru.