

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

Перегиняк А.П., Богуславский В.А. (каф. ТМ, ДонНТУ, г.Донецк, Украина)

Процесс обработки осевым инструментом имеет ряд особенностей, вызываемых большим значением глубины резания по сравнению с обработкой лезвийным инструментом и точением в частности. Это приводит к удалению больших единичных объемов обрабатываемого металла, и как следствие – к выделению большого количества тепла, отвод которого из зоны резания сильно затруднен.

Таким образом, задача повышения эффективности работы осевого инструмента является комплексной и включает в себя решение проблем отвода тепла из зоны резания, снижения уровня ее концентрации в детали и инструменте, удаления стружки и увеличения режимов резания (в некоторых случаях). Данная задача может быть разрешена на практике путем применения специальных смазочно-охлаждающих технологических сред, а также инструмента со специальной конструкцией, облегчающей подачу СОТС в зону резания, отвод стружки, ее дробление и т.п.

Все три составляющих комплексной задачи повышения эффективности обработки находят свое отражение в благоприятном воздействии СОТС на процесс резания. Такое воздействие представляет собой комбинацию отдельных функций СОТС на материал инструмента и детали, к которым относятся [1]:

- смазывающая функция;
- диспергирующая функция (механическое действие);
- охлаждающая функция;
- смывающая функция;
- соответствие санитарно-эпидемиологическим нормам;
- антикоррозионная функция (химическая защита);
- физико-химическое действие.

Смазывающая функция объясняется способностью СОТС (эмульсий, масел и различных твердых смазок) образовывать на поверхностях контакта смазочную пленку, которая вследствие высокого молекулярного сродства к металлу не вытесняется режущим инструментом и разобщает металлические поверхности, предотвращая явления слипания-сваривания контактных поверхностей, находящихся под действием высоких давлений и контактных температур. В результате существенно снижаются силы трения между соприкасающимися поверхностями.

Механическое (диспергирующая функция, эффект Ребиндерра) действие выражается в так называемом «расклинивании» опережающей трещины, что происходит в результате проникновения СОТС в микротрещины. При этом СОТС вытесняет воздух, смачивает поверхность мономолекулярным слоем и продолжает расклинивающее действие. Жидкость, проникая вглубь обрабатываемого материала, увеличивает зону предразрушения, которая увеличивает свои размеры и приводит к облегчению процесса разделения материала, что приводит к снижению требуемого усилия подачи.

Охлаждающая функция определяется теплопроводностью и теплоемкостью СОТС, которая в процессе работы частично испаряясь, и обладая способностью смачивать материал инструмента и заготовки, поглощает и отводит тепло, понижая при этом температуру стружки, инструмента, заготовки и контактных поверхностей. [1]

Смывающая (или транспортирующая) функция приводит к выносу элементов стружки из зоны резания. Механическое смывание стружки струей воды особенно

необходимо при сверлении и зенкеровании, так как усиленная струя способствует большему отводу тепла и стружки из зоны резания.

Антикоррозионная функция проявляется в защите образующейся в процессе резания обработанной поверхности заготовки от вредного воздействия атмосферы воздуха. Однако СОТС могут не обеспечивать достаточной химической защиты зоны резания и в ряде случаев даже вызывать коррозию обработанной поверхности детали и самого инструмента.

Кроме главных функций, обеспечивающих процесс резания, СОТС должны соответствовать санитарно-эпидемиологическим нормам и не оказывать вреда для жизни и здоровья работающего персонала. Так, некоторые СОТС показывают очень хорошие результаты, но из-за своей токсичности их приходится исключать из использования. Так, на данный момент, не рекомендованы к применению СОТС, содержащие в своем составе хлор, серу, фосфор, азот в несвязанном виде.

Помимо прочего, использование СОТС оказывает влияние на эксплуатационные характеристики деталей, способствуя уменьшению глубины и степени наклепа, а также уровня остаточных напряжений. При сверлении это влияние незначительно, но при зенкеровании, а особенно развертывании с малой глубиной резания на поверхности отверстий имеет место достаточно сильный наклеп [2].

Физико-химическое действие СОТС оказывает влияние на свойства материала поверхностного слоя. Так, например, применение СОТС, содержащих серу и хлор, приводит к образованию в поверхностном слое активных химических соединений, вызывающих при последующем обезуглероживании водородную хрупкость и интенсивную внутримолекулярную коррозию [2].

Таким образом, в специфику своих особенностей (высокой концентрации тепла в зоне резания, плохой теплопроводности материалов, сложности удаления стружки и наличия сильного трения, на контактных поверхностях инструмента с деталью), при сверлении наиболее значимыми функциями СОТС выступают: смазывающая, охлаждающая, транспортирующая и диспергирующая.

Так, смазывающая функция приводит к уменьшению трения между рабочими и вспомогательными поверхностями инструмента с обрабатываемыми поверхностями. Это приводит к уменьшению количества выделяемого тепла и благоприятно влияет на качество поверхности и на стойкость сверла. СОТС, применяемая в этом случае, должна обладать довольно малым поверхностным натяжением и высоким молекулярным сродством к обрабатываемому металлу.

Охлаждающая функция при сверлении остается не менее важной, так как тепло выделяется не только в парах трения (передней поверхностью сверла со стружкой и задней поверхностью с обрабатываемой деталью), но и от деформации материала заготовки и инструмента, при сверлении этот процесс затруднен еще и замкнутостью объема, т.е. стружка претерпевает дополнительные деформации, что вызывает дополнительный нагрев. Высокая температура, развивающаяся при этом, превращает мартенсит быстрорежущих сталей в переходные более мягкие структуры, в результате чего режущий инструмент быстро изнашивается. Вследствие плохой теплопроводности труднообрабатываемых материалов, это тепло концентрируется в зоне резания и приводит к повышенному износу инструмента (что приводит к заклиниванию сверла и выходу его из строя) и физико-механическому изменению поверхностного слоя обрабатываемого металла. Для эффективного теплоотвода, СОТС должна обладать хорошей теплопроводностью и сохранять все свои остальные свойства под действие высоких температур.

Транспортирующая функция проявляется в выносе элементов стружки по спиральным канавкам из зоны резания. Ее значение столь же велико, как двух предыдущих, так как скопление стружки неминуемо приводит к заклиниванию сверла и его поломке. Транспортирование стружки потоком СОТС осуществляется, как правило, под действием давления жидкости на нее, а так же связыванием ее элементов. Таким образом, для эффективного выполнения этой функции СОТС должна обладать хорошей вязкостью, которая характеризует ее обволакивающие свойства, но в тоже время и достаточной жидкотекучестью, достаточной для того, чтобы СОТС попала в капилляры и поры металла.

На эффективность действия СОТС влияют не только их физико-механические и теплопроводящие свойства, но и геометрические параметры самого режущего инструмента. Так, на транспортирующее действие СОТС непосредственно влияет угол наклона винтовой канавки ω , а на сам способ подачи СОТС - наличие каналов в сердцевине сверла и дополнительных конструктивных элементов.

Роль угла наклона винтовой канавки в процессе резания достаточно велика, так как он влияет на значения крутящего момента и усилия подачи, на форму стружки и ее отвод из зоны резания. Так, для получения стружки в виде завитков, легко выходящих из канавки необходимо обеспечить довольно большое значение угла ω , что негативно отразится на жесткости сверла и приведет к ослаблению режущего клина у периферии сверла. С точки зрения формы и отвода стружки оптимальным углом для стали надо считать $\omega = 34-40^\circ$ [2]. Однако, величина угла наклона меняется в зависимости от обрабатываемого материала, что вызывает дополнительные трудности в конструировании сверл.

Итак, повышение эффективности работы осевого инструмента базируется на применении специальных СОТС, обладающих малым поверхностным натяжением и высоким молекулярным сродством к обрабатываемому металлу, хорошей теплопроводностью и теплоемкостью и способностью смачивать материал инструмента и заготовки, хорошей вязкостью и достаточной жидкотекучестью, соответствовать санитарно-эпидемиологическим нормам, обладать антикоррозионными свойствами и не вызывать физико-химического изменения поверхностного слоя материала детали и инструмента. В свою очередь, сверло должно обладать специальной конструкцией, позволяющей с легкостью выводить стружку и при этом достаточной жесткостью и прочностью. Это можно достичь путем варьирования значением угла наклона винтовой канавки (оптимальным для стали можно считать $\omega = 34-40^\circ$).

Однако, данная комплексная задача не может быть решена для всех инструментальных и конструкционных материалов, что приводит к необходимости создания специального программно-математического комплекса.

Список литературы: 1. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М., «Высш. школа», 1974. – 587с. 2. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов. А.М. Даниелян, П.И. Бобрик, Я.Л. Гурьевич, И.С. Егоров /Под. ред. Гурьевича Я.Л. М. «Машиностроение», 1965. – 308с.

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ОДИНИЧНОГО АЛМАЗНОГО ЗЕРНА ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ СТАЛІ Р6М5Ф3

Прохорова Е.В., Матюха П.Г. (каф. МС, ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)

Визначення напруженого стану алмазного зерна дозволяє визначити режими, що виключають його руйнування. У більшості випадків визначення оптимальних режимів шліфування здійснюється експериментально [1,2,3], що вимагає великих витрат часу на проведення експериментів та їхню обробку. Сьогодні набуває використання комп'ютерне математичне моделювання, наприклад, при дослідженні системи „надтвердий матеріал – зерно – зв'язка” [4], і є перспективним методом напруженого стану алмазного зерна.

Метою роботи є спроба визначення напруженого стану одиничного алмазного зерна з використанням програми ANSYS.

У якості вихідних даних для рішення задачі використаємо характеристику шліфувального круга, яка включає тип алмазу, властивості матеріалу зв'язки й алмазного зерна, а також режими оброблювання. У якості досліджуваного шліфувального круга був взятий алмазний шліфувальний круг на металевій зв'язці 1А1 250×16×5×76 АС6 100/80-4-М1. Оброблюваний матеріал – швидкорізальна ванадієва сталь Р6М5Ф3. Металева зв'язка шліфувального круга є сплавом двох матеріалів міді (77%) і олова (23%).

Як показує аналіз літературних джерел, у загальному виді форму зерна можна розглядати як реалізацію випадкової функції, що являє собою сукупність синусоїд різних частот з випадковими амплітудами і фазами. Разом з тим, при теоретичних розрахунках, складна геометрична форма реальних алмазних зерен замінюється спрощеним геометричним тілом: кулею, прямокутним паралелепіпедом або циліндром. В нашому випадку форму алмазного зерна замінимо суцільною кулею [5] радіусом 66 мкм з площадкою контакту та виділимо об'єм зв'язки навколо нього розміром 340×340×200 мкм.

Усі необхідні дані для рішення поставленої задачі приведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1. Властивості матеріалів

Матеріал	Модуль пружності E , Па	Коефіцієнт Пуассона
Алмаз	$8.2 \cdot 10^{11}$	0,1
Зв'язка	$1 \cdot 10^{11}$	0,24

Таблиця 2. Сили різання на одиничному зерні, які виникають при обробленні сталі Р6М5Ф3 кругом зазначеної характеристики [5]

1. Вплив часу шліфування на складові сили різання ($V_k=3.5 \text{ м/с}$, $V_d=6 \text{ м/мин}$, $t=0,015 \text{ мм}$)		
Час шліфування τ , хв	Сили різання, Н	
	P_y	P_z
1	2	3
15	3,3	0,9
30	2,95	1,2

45	2,7	1,0
1	2	3
2.Вплив глибини шліфування на складові сили різання ($V_k=35\text{м/с}$, $V_d=6\text{м/мин}$, $\tau=30\text{ хв}$)		
Глибина шліфування t_f , хв	Сили різання, H	
	P_y	P_z
0,01	2,9	1,0
0,015	2,9	1,2
0,02	2,93	1,26
0,025	3,0	1,27
3.Вплив швидкості оброблюваної деталі на складові сили різання ($V_k=35\text{м/с}$, $t=0,015\text{мм}$, $\tau=30\text{ хв}$)		
Швидкість деталі V_d , м/хв ,	Сили різання, H	
	P_y	P_z
6	2,91	1,2
9	3,2	1,38
12	3,52	1,54

Схема дії сил різання на алмазне зерно наведена на рис. 1. Сила P_z спрямована в напрямку протилежному швидкості різання V , P_y – перпендикулярно площині зв'язки. Точка перетину складових P_y і P_z знаходиться в центрі плоскої контактної площадки, яка розташована на моделі зерна.

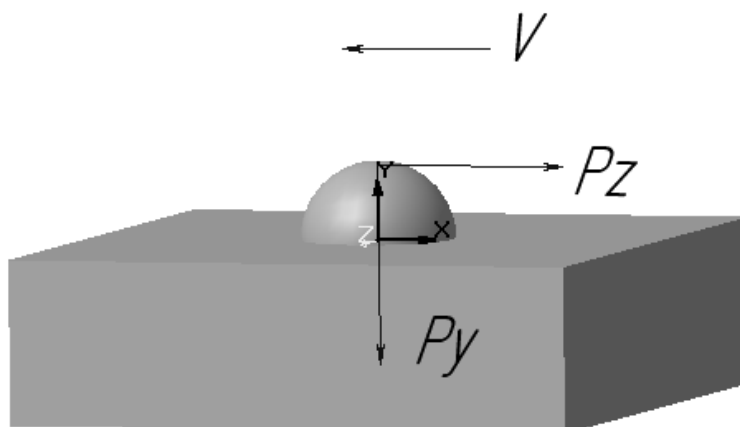


Рис. 1. Схема дії сил різання на зерно шліфувального круга

Алгоритм рішення задачі зводиться до наступних основних етапів:

- 1) визначення типу аналізу і системи вимірювання;
- 2) вибір типу елемента;
- 3) побудова моделі;
- 4) розбивка моделі на кінцеві елементи;
- 5) визначення умов закріплення;
- 6) задавання умов навантаження;

- 7) визначення властивостей вирішувача і його пуск;
- 8) обробка і аналіз отриманих даних.

Чисельний аналіз методом кінцевих елементів є методом наближеного рішення задачі. В його основі лежить принцип розбивки суцільного безперервного середовища на кінцеві елементи, характер взаємодії яких відомий. Критерієм оптимізації при рішенні задачі є мінімум потенційної енергії тіла.

Модель зерна в зв'язці після розбивки на кінцеві елементи і закріплення наведено на рис. 2.

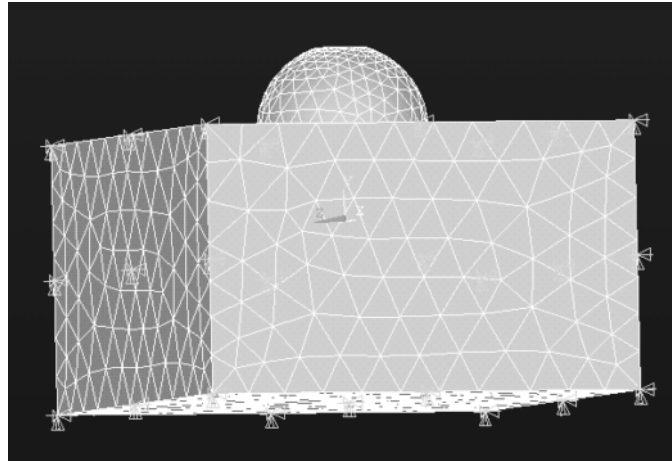


Рис. 2. Модель зерна в зв'язці після розбивки на кінцеві елементи і закріплення

Загальний вигляд напруженого стану з площадкою зносу на зерні наведений на рис. 3, а розрахунки максимальних напружень в залежності від режимів різання — на рис. 4.

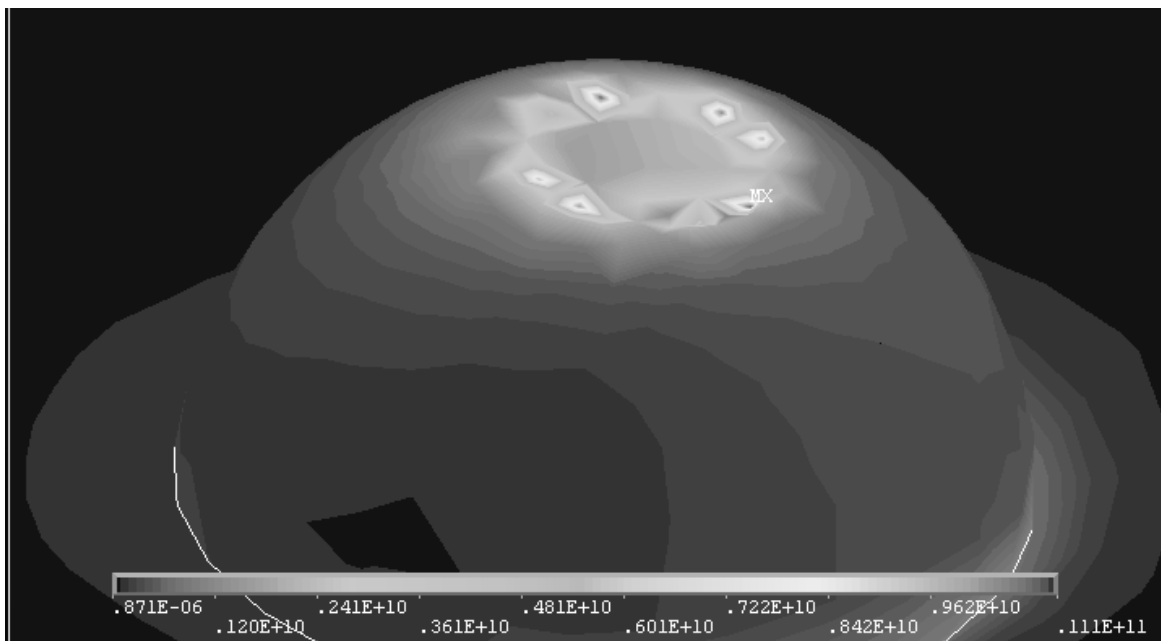
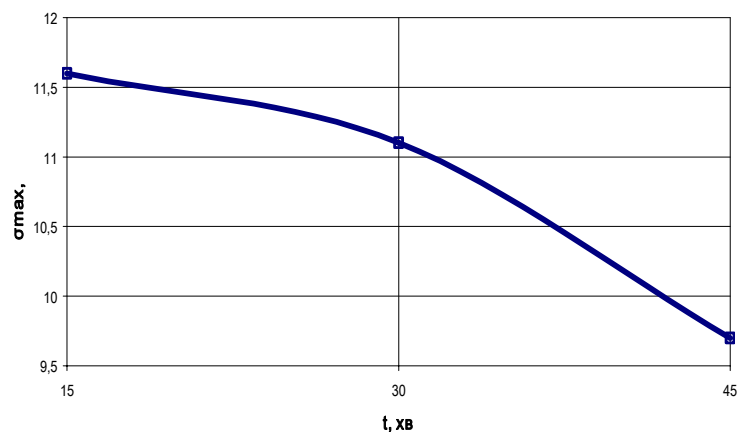
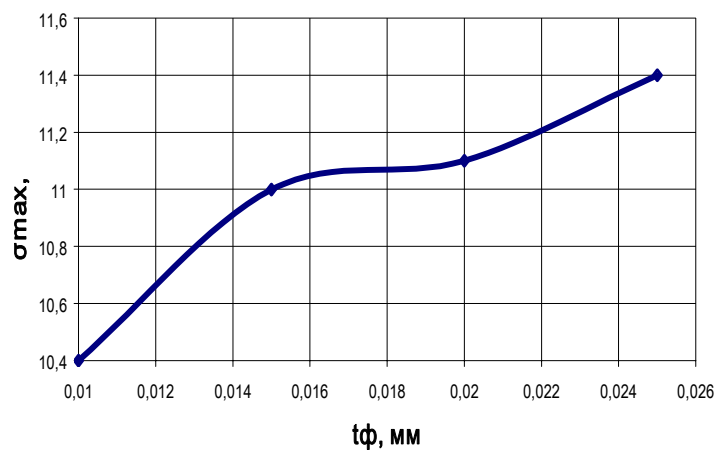


Рис. 3. Напружений стан моделі з площадкою зносу на зерні (збільшене)

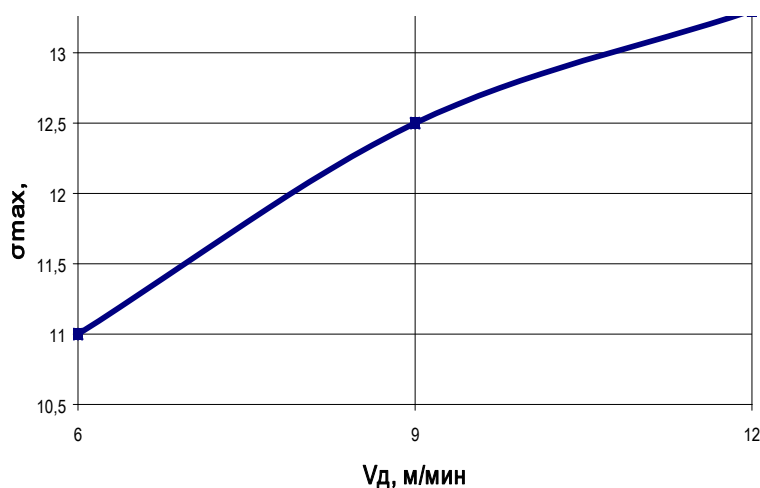
Як видно із рисунка 3, найменші напруження виникають на площадці зносу в центрі, тому що «нове» алмазне зерно при даних зусиллях різання миттєво руйнується на вершині кулі і тим самим утворює площадку з оброблюваним матеріалом, яка потім збільшується. Це відбувається доти, поки напруження, що виникають у зерні, не стануть менше припустимих.



а)



б)



в)

Рис. 4. Графіки впливу часу шліфування (а), глибини шліфування (б), швидкості оброблюваної деталі (в) на напружений стан моделі зерна з площадкою зносу

Аналізуючи дані графіків можна зробити висновок про те, що зі збільшенням часу шліфування напруження на одиничному зерні зменшуються, але сумарне напруження на крузі росте, тому що збільшується величина площадок контакту на задній поверхні зерна, а також кількості одночасно контактуючих зерен, унаслідок зменшення з часом різновисотного положення зерен.

Зі збільшенням глибини шліфування t_{ϕ} і швидкості деталі V_d відбувається збільшення напруження, тому що збільшуються складові сили різання, ріст яких обумовлений у першому випадку збільшенням числа одночасно контактуючих зерен і максимальної висоти нерівностей на поверхні різання, що сприяють збільшенню фактичної товщини одиничного зрізу, у другому – збільшенню всіх параметрів поперечного перерізу одиничного зрізу і кількості одночасно контактуючих зерен.

Висновок: Отримана інформація буде використана в подальшому при визначенні обмежуючих режимів оброблення з використанням допустимих нормальних напружень в зерні.

Список літератури: 1. Узунян М.Д. Повышение эффективности алмазного шлифования твердых сплавов путем прогнозирования и стабилизации работоспособности кругов: Автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.03.01/ Мосстанкин. – М., 1989. – 40с. 2. Основы алмазного шлифования/ М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб и др.– К.: Техніка, 1978. – 192с. 3. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник/ Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 1977. 391с. 4. Федорович В.А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис....докт. техн. наук 05/03/01/ НТУ «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2002. – 36с. 5. Матюха П.Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга. Автореф. дис.... докт. техн. наук – Харьков, 1996, – 48с.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕРНА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

Савельев В.В., Гусев В.В. (каф. МСтанки, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Шлифование обеспечивает получение высокой чистоты обработанной поверхности и высокой точности размеров деталей.

В процессе шлифования изменяется состояние рабочей поверхности шлифовального круга (РПК). Изменяются ее геометрические параметры, форма, размеры режущих зерен, что приводит к потере шлифовальным кругом своей режущей способности и ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

Для исключения влияния износа рабочей поверхности круга на качество и производительность шлифования периодически или во время обработки производят правку шлифовальных кругов.

Среди различных способов управления РПК алмазных шлифовальных кругов на металлической связке можно выделить два метода: электроэрозионный метод и метод правки свободным абразивом. Электроэрозионный способ правки

достаточно хорошо изучен и распространен, в то время как правка свободным абразивом еще не достаточно исследована.

При электроэрозионном методе правки шлифовальных кругов на металлической связке технологическое воздействие на РПК оказывается с помощью технологической энергии, которая, воздействуя на шлифовальный круг, выплавляет связку и при этом ослабляется способность связки удерживать наиболее выступающие затупившиеся зерна. Воздействие на РПК данными методами возможно даже во время обработки различных материалов.

Метод правки свободным абразивом заключается в механическом воздействии на связку шлифовального круга. Правка осуществляется с помощью частиц свободного абразива, подаваемого в зону правки в составе суспензии через отверстие в притире [1]. При вращении шлифовального круга зерна свободного абразива попадают в зазор между поверхностью круга и притира, которые перекатываясь по поверхности круга, удаляют затупившиеся зерна и связку. При этом за алмазным зерном образуются «подпорки» из связки. Производительность восстановления режущей способности данным методом круга очень высокая в отличие от электроэрозионного метода.

Цель исследования заключается в установлении влияния метода правки на устойчивость зерен при алмазном шлифовании. Ограничивающим фактором при анализе прочности закрепления алмазного зерна являются физико-механические свойства материала связки ($\sigma_m=290$ МПа).

Нами производился сравнительный анализ устойчивости моделей зерна в связке: для шлифовального круга после правки электроэрозионным методом и шлифовального круга после правки свободным абразивом. Отличительной особенностью этих моделей является наличие у второй канавки в связке перед зерном и «подпорки» за ним, что является следствием перекатывания зерен свободного абразива по рабочей поверхности шлифовального круга во время правки.

Для анализа был взят алмазный шлифовальный круг на металлической связке *1A1 200x63x75 AC32 100/80 M2-01*. Связка шлифовального круга является сплавом двух материалов меди (77%) и олова (23%) [2].

Моделирование процесса воздействия сил резания на алмазное зерно производилось в среде ANSYS, в которой были построены две модели зерна, отличающиеся между собой формой связки, ограничивающей зерно. Нами принято, что размеры алмазного зерна соответствуют выбранной зернистости исследуемого шлифовального круга и равны 100×60 мкм. Диаметр площадки износа для двух моделей равен 10 мкм. Вылет вершины зерна из связки равен половине его длины - 50 мкм. Разбивка моделей производилась на наименьший размер конечных элементов для обеспечения большей точности расчетов. Условно зерно закреплено в связке вдоль наибольшей оси (рис.1). Зерно имеет цилиндрическую форму с двумя коническими участками на концах. Выступающий конус алмазного зерна имеет усеченную форму. Все вышеперечисленные параметры модели шлифовального круга приняты с некоторыми допущениями и упрощениями, т.к. в реальности зерна шлифовального круга располагаются хаотически, имеют разную форму и отличаются по размерам.

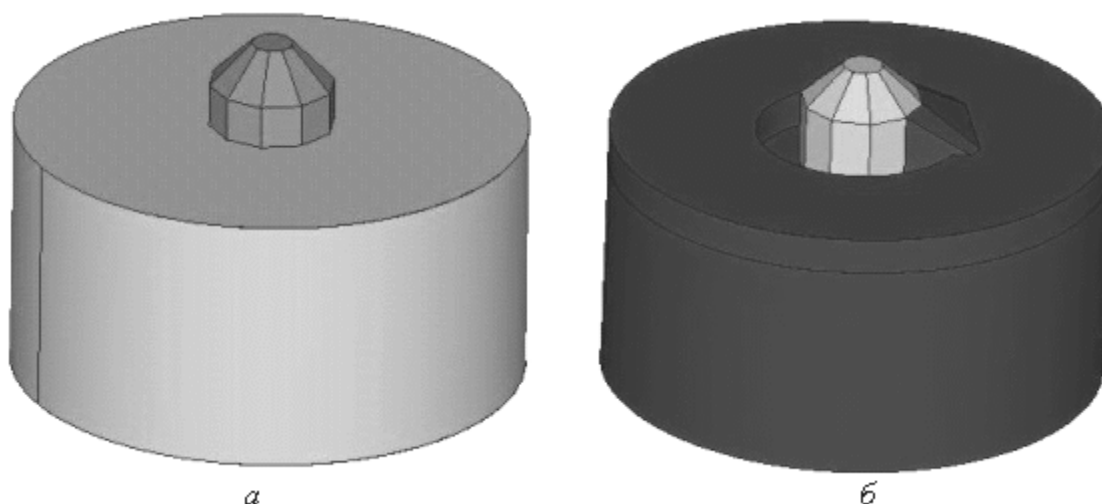


Рис. 1. Модель алмазного зерна в связке шлифовального круга
 а – после правки электроэрозионным методом
 б – после правки свободным абразивом

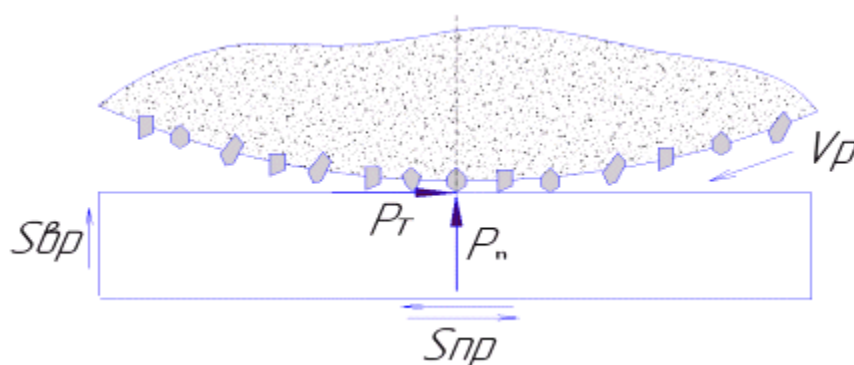


Рис. 2. Схема действия сил резания на единичное зерно шлифовального круга

Результирующая сила резания, действующая на зерно (рис.2), разложена на две составляющие: тангенциальную - P_τ и нормальную - P_n . Численные значения сил подобраны такими, чтобы напряжения в связке достигали предела текучести, а соотношение между силами лежит в пределах $Ka = \frac{P_\tau}{P_n} = 0.15 \dots 0.4$ [2].

Согласно приведенной схеме действия сил резания на зерно рассчитаны напряжения в связке, возникающие в условиях резания при шлифовании для двух моделей. Характер распределения напряженного состояния на зерне и связке для рассматриваемых схем закрепления представлены на рис.3 и рис. 4.

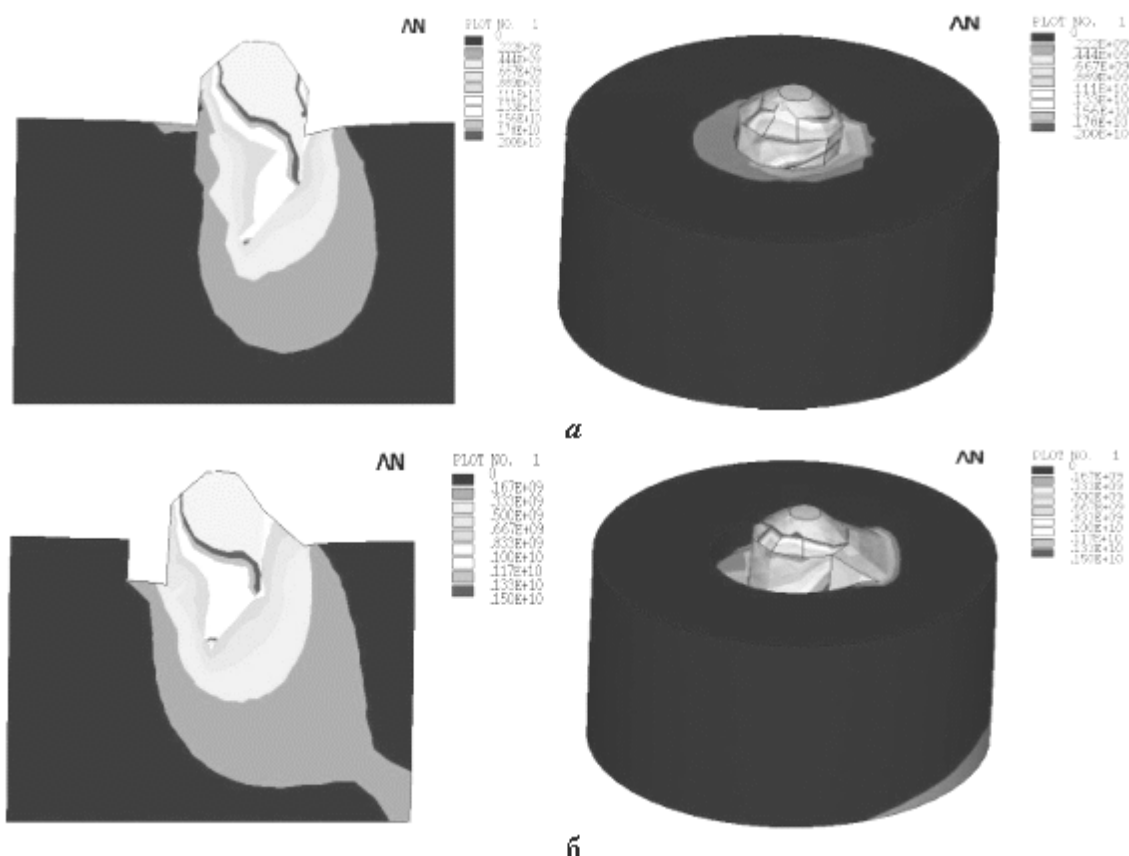


Рис. 3. Распределение напряжений в связке шлифовального круга при $P\tau = 0.15$, Н; $Pn = 0.05$ Н; а – после правки электроэрозионным методом; б – после правки свободным абразивом

Из приведенных рисунков видно, что зерно под действием тангенциальной составляющей силы резания проворачивается на некоторый угол, а от действия нормальной силы углубляется в связку. Суммарное смещение вершины зерна при $P\tau = 0.15$, Н; $Pn = 0.05$ Н составляет 0.89 мкм. для модели шлифовального круга после правки электроэрозионным методом и 0.75 мкм. для модели после правки свободным абразивом, что свидетельствует о более устойчивом закреплении зерна в связке шлифовального круга после правки свободным абразивом.

Максимальные напряжения в связке, как у первой, так и у второй модели возникают у кромок алмазного зерна. Характер распределения напряжений в объеме связки одинаков для обеих моделей, отличие состоит только в численных значениях.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния в связке для двух моделей шлифовального круга приведены на рис. 4.

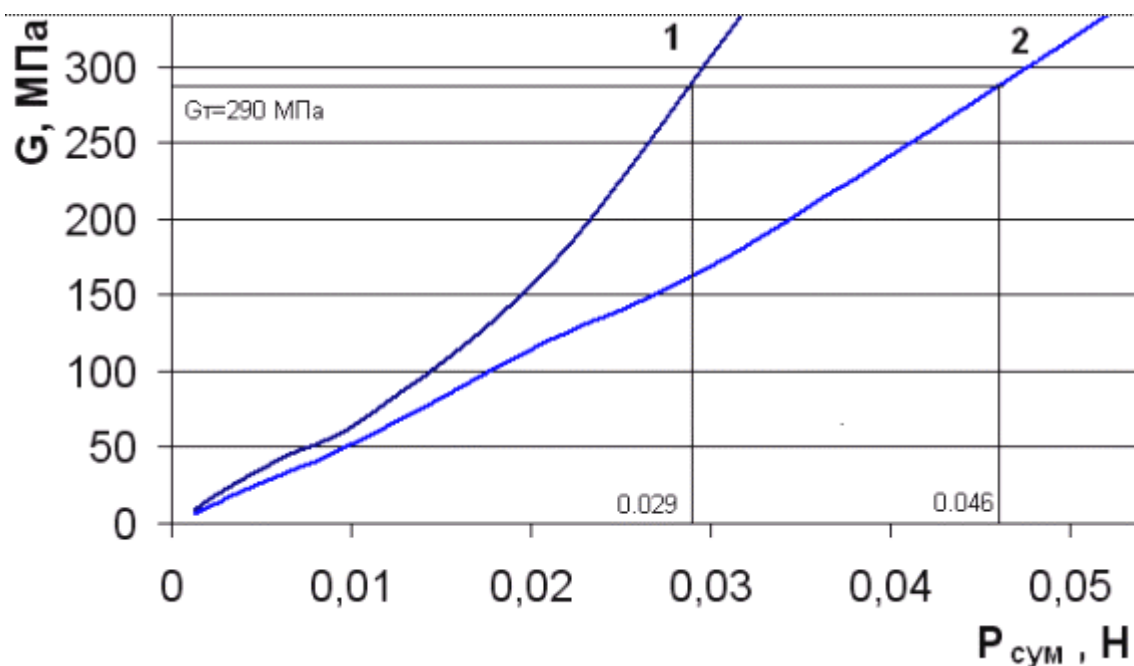


Рис. 4. График роста максимальных напряжений в связке под действием сил резания: 1 - после правки электроэрозионным методом
2 - после правки свободным абразивом

Силы, действующие на алмазное зерно шлифовального круга после правки свободным абразивом перераспределяются по большей поверхности контакта зерна и связки за счет наличия за зерном «подпорки».

Из приведенных данных видно, что алмазные зерна шлифовального круга после правки свободным абразивом имеют большую устойчивость, т.к. максимальные напряжения в связке достигают предела текучести при нагрузке на зерно $P_{\text{сум}} = 0,029 \text{ Н}$ ($Ka=0,15$) для шлифовального круга после правки электроэрозионным методом и $P_{\text{сум}} = 0,046 \text{ Н}$ ($Ka=0,15$) после правки свободным абразивом. Запас прочности у второй модели согласно полученным данным составляет 35-40%, чем можно воспользоваться при интенсификации режимов обработки шлифованием.

При затуплении режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга соотношение осевой и тангенциальной составляющей силы резания, действующей на зерно, меняется. Как известно коэффициент абразивного резания изменяется в пределах от 0,15 до 0,4 [2]. Рост нормальной составляющей силы резания связан с увеличением площадки износа на алмазном зерне. Таким образом, значение $Ka = 0,15$ соответствует шлифованию изношенным шлифовальным кругом, а $Ka = 0,4$ относится к шлифованию новым кругом или кругом после правки. Еще одним фактором, влияющим на соотношение нормальной и тангенциальной составляющей силы при шлифовании хрупких неметаллических материалов, являются свойства обрабатываемого материала (индекс хрупкости) [2].

Для определения влияния угла наклона силы резания на напряжения в связке исследуем процесс действия сил резания на зерно при одной переменной и одной постоянной составляющей силы резания. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Данные расчетов максимальных напряжений в связке при $P\tau = 0.006 \text{ Н}$

Коэф. абразивного резания	Нормальная составляющая силы резания	Модель шлифовального круга после правки электроэрозионным методом	Модель шлифовального круга после правки свободным абразивом
Ka	$P_n, \text{ Н}$	G, МПа	G, МПа
0,15	0,04	210	185
0,24	0,025	170	140
0,4	0,015	132	105

При затуплении режущих зерен шлифовального круга, а также при увеличении индекса хрупкости обрабатываемого материала происходит увеличение нормальной составляющей силы резания относительно тангенциальной. Это приводит к росту напряжений в связке.

Для исследованных моделей закрепления зерна, которые характерны для различных способов правки, наблюдается одинаковый характер напряженно-деформированного состояния в системе «зерно-связка». Отличие заключается только в величине напряжений, возникающих при этом. Как видно из приведенных данных напряжения в связке шлифовального круга после правки свободным абразивом меньше, чем после правки электроэрозионным методом при неизменной нагрузке на зерно.

Выводы.

В ходе исследований выявлено, что зерна шлифовального круга после правки свободным абразивом обладают большей устойчивостью, чем после правки электроэрозионным методом. Причиной этого является наличие «подпорки» из связки за зерном, которая образуется в процессе правки и является дополнительной опорой для последнего. Для исследуемой модели зерна запас прочности его закрепления в связке шлифовального круга после правки свободным абразивом составляет 35...40% по сравнению с моделью его закрепления после правки электроэрозионным методом. Следовательно, шлифовальный круг после правки свободным абразивом имеет возможность воспринимать большие нагрузки и обладает большей производительностью за счет возможности увеличения режимов резания.

Список литературы: 1. Бурмистров В.В. Способ правки шлифовального инструмента свободным абразивом. – Авторское свидетельство СССР №967784, кл. В 24 В 53/013, 1981. 2. Гусев В.В. Силы резания и формирование дефектного слоя при алмазном шлифовании керамики // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. - Краматорськ: ДДМА. – 2003. – Вип. №13. – с.70-76.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО МАЧТОВОГО УСТРОЙСТВА

Сальников В.В. (кафедра ИП, ТулГУ, г. Тула, Россия)

Проектирование мобильных систем наблюдения за перемещающимися в воздухе объектами и управления их движением связано с учетом множества зачастую противоречивых требований к мачтовым устройствам, предназначенным для подъема и удержания рабочего оборудования на требуемой высоте. Устройство с одной стороны должно иметь возможно минимальные массово-габаритные характеристики в транс-

портном положении, с другой стороны максимальную высоту подъема в рабочем положении и необходимую пространственную жесткость при условии быстрого и с минимальными затратами людских ресурсов перевода из транспортного положения в рабочее. По большинству параметров этим требованиям удовлетворяют телескопические мачтовые устройства (ТМУ). Одним из направлений совершенствования этих устройств является применение высокопрочных, в том числе композиционных, материалов для изготовления телескопических мачт. При этом существенные трудности возникают с расчетом их прочности и устойчивости - основы оптимизационных алгоритмов.

В Тульском госуниверситете разработан программный комплекс оптимизации параметров телескопических мачт. В качестве расчетной схемы ТМУ (рис. 1) принят стержень с прямолинейными участками ступенчато-переменного сечения, имеющий изломы оси ненагруженного состояния в местах телескопических сочленений. Стержень загружен осевой, внецентренно приложенной нагрузкой, и поперечной, распределенной по длине, нагрузкой.

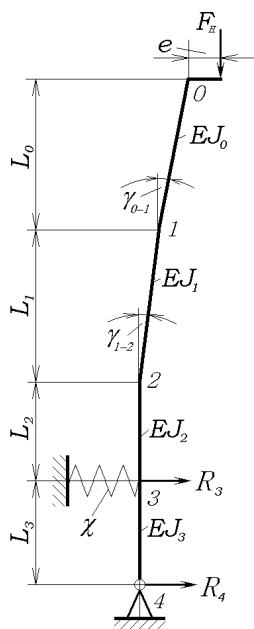


Рис. 1. Расчетная схема задачи

Для решения использован метод начальных параметров в редко используемой форме «продолжения решения», оказавшейся весьма удобной применительно к машинным алгоритмам.

Матричный алгоритм способа имеет вид:

$$|Y_n| = |F_n| \cdot |L_n| \cdot |F_{n-1}| \cdot |L_{n-1}| \cdot |F_{n-2}| \cdot \dots \cdot |F_1| \cdot |L_1| \cdot |Y_0|,$$

где $|Y_n|$ - матрица параметров НДС в поперечном сечении стержня;

$|F_n|$ - матрица перехода границы силового участка;

$|L_n|$ - матрица силового участка;

$|Y_0|$ - матрица параметров НДС в начальном сечении.

Произведение матриц при использовании этого способа решения задач представляет искомую связь между силовыми воздействиями и деформациями на концах стержня или между начальным сечением и произвольно выбранным сечением. Матрица $|Y_0|$ является матрицей-столбцом, образованным из 4-х параметров НДС в начальном сечении: y_0 - прогиб, φ_0 - угол поворота, M_0 - момент, Q_0 - поперечная сила. В зависимости от условий закрепления из четырёх параметров y_0 , φ_0 , M_0 и Q_0 в начальном сечении часть параметров оказывается известными, оставшиеся находятся из решения системы алгебраических уравнений, образованных формализацией граничных условий в конечном сечении стержня.

Матрица $|L_n|$ силового участка длиной L определяется видом непосредственного нагружения участка. В задаче продольно-поперечного изгиба матрица $|L_n|$ имеет вид

$$\begin{vmatrix} 1 & -L & (1-\cos \lambda L) & \frac{1}{\lambda}(\lambda L - \sin \lambda L) \\ 0 & 1 & -\lambda \sin \lambda L & \cos \lambda L \\ 0 & 0 & \cos \lambda L & \frac{1}{\lambda} \sin \lambda L \\ 0 & 0 & -\lambda \sin \lambda L & \cos \lambda L \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

где $\lambda_i = \sqrt{\frac{F_i}{EI_0}}$ - параметр жесткости, $Y_*, Y'_*, EJY_*, EJY_*''$ - параметры, определяемые

видом поперечной нагрузки. Последние представляют собой частные решения дифференциального уравнения продольно-поперечного изгиба.

Границами силового участка являются сосредоточенные воздействия. Наличие на границе участков сосредоточенных воздействий (сила, момент, принудительный прогиб, угол поворота, опора жесткая или упругая, шарнир и т.д.), изменение сечения и интенсивности нагрузки требует формализации условий сопряжения двух участков. В целях сохранения алгоритма, условия перехода записаны в матричной форме. Для упругоподатливой и упруговращающейся опоры матрицы перехода границы участков получены в работе [1]. Алгоритм построен таким образом, что при любой нагрузке порядок матриц остается не более 5×5 [2].

Поскольку применение градиентных методов оптимизации в рассматриваемой задаче практически невозможно, в качестве оптимизационного алгоритма использован метод случайного поиска. Критерием оптимизации является масса мачты, варьируемые параметры – диаметры поперечных сечений, толщины стенок, зазоры в телескопических сочленениях. Ограничением является максимальное значение горизонтального отклонения платформы с оборудованием. На каждом шаге поиска определяется суммарная масса и формируется целевая функция. Задание приращений независимым параметрам для перехода от одной точки пространства параметров к новой реализован по схеме: $u_j^{k+1} = u_j^k + M^k m_j e_j^k$, где k – индекс шага, j – индекс параметра, m_j – индивидуальные масштабы параметров, M^k – масштаб поиска, e_j^k – приращение j -го параметра на k -том шаге при $M^k = 1$.

Масштаб поиска является общим для всех параметров и автоматически выбирается в процессе поиска. В поисковом блоке организовано обучение по результатам последнего шага: если сделан удачный шаг, то существует ненулевая вероятность того, что следующий шаг в том же направлении приведет к дальнейшему улучшению критерия качества. В этом случае обучение (по удачной попытке) заключается в фиксации полученного удачного направления $e_j^k = e_j^{k-1}$. Это направление удерживается до тех пор, пока критерий качества улучшается. После получения неудачной попытки снова производится случайный шаг поиска.

Приведенный алгоритм позволяет определить локальный экстремум; для глобального поиска он несколько модифицирован. При уменьшении масштаба поиска M^k ниже определенного значения, что свидетельствует о приближении локального экстремума и определении его с достаточной точностью, производится увеличение масштаба поиска с последующим случайным шагом. Число попыток ограничивается априори.

Для оптимизации по критерию материалоемкости введена функция связи усилий в сечениях элементов от внешних нагрузок и расходом материала на малом участке. На каждом шаге поиска определяется расход и формируется целевая функция. В остальном используется приведенные выше соотношения. Допустимые отклонения выходного звена в этом случае вводятся в форме граничных условий. В результате работы подпрограммы определяется минимальная масса устройства.

Программа имеет интерфейс пользователя, результаты могут быть представлены в виде графика.

Выполненный пилотный проект телескопического мачтового устройства позволил снизить массу на 16 % при некотором увеличении трудоемкости изготовления. Комплекс разработан с полным соблюдением нормативных требований.

Список литературы: 1. Пономарев К.К. Расчет упругих систем методом продолжения. Вестник московского университета. №6, 1959. – С. 12-36. 2. Сальников В.Г. Силовые гидроцилиндры грузоподъемных машин. Выбор метода прочностного расчета. Конструирование и эксплуатация подъемно-транспортных машин. Тула, ТулПИ, 1985. – С. 78-83.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ДИАГНОСТИКЕ ЭМС

Хоменко В.Н., Борисенко В.Ф. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

В диагностике электромеханических систем большое значение уделяется обработке получаемых с датчиков сигналов. Измеряются сигналы, имеющие механическую природу (крутящий момент, частота вращения, вибропараметры – виброперемещение, виброскорость, виброускорение), и электрическую (потребляемая мощность, ток, напряжение).

Применение различных методов обработки сигналов позволяет рассмотреть особенности сигналов, выделить из них определенные диагностические признаки. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся методы.

♦ *Функция взаимной корреляции:*

$$K_{xy}(\tau) = \langle x(t)y(t+\tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

где $x(t), y(t)$ – исходные сигналы;
 T – период сигналов (рассматриваемый интервал);
 τ – сдвиг между сигналами (лаг).
 Для дискретных сигналов:

$$K_{xy_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i y_{i+j} \quad (2)$$

где N – количество информации.
 Функция взаимной корреляции позволяет, среди прочего:

- определить взаимозависимость функций;
- оценить величину «запаздывания» между сигналами τ .

♦ *Функция автокорреляции*

Автокорреляция – корреляция функции с самой собой с задержкой на величину τ . Периодические свойства исходной функции могут быть определены с помощью коррелограммы. Коррелограмма показывает коэффициенты автокорреляции для определенного диапазона лагов.

Функция автокорреляции:

$$K_{xx}(\tau) = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (3)$$

Для дискретных сигналов:

$$K_{xx_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i x_{i+j} \quad (4)$$

Функция автокорреляции позволяет, среди прочего:

- определить наличие периодических свойств сигнала;
- при $\tau=0$ оценить энергию сигнала $K_{xx}(0) = \|x(t)\|^2$.

♦ *Спектр Фурье*

Спектр Фурье – это представление сложного сигнала в виде конечной или бесконечной суммы гармоник. На практике, при расчете на ЭВМ, в любом случае максимальное количество составляющих этой суммы принимают равным N .

Применяется для оценки присутствия в форме сигнала гармонических составляющих определенных частот. Обычно представляется в виде графиков: $A_k(\omega_k)$ – амплитудный спектр сигнала и $\varphi_k(\omega_k)$ – фазовый спектр сигнала, $A_k^2(\omega_k)$ – спектр мощности.

Таким образом, исходный сигнал представляется в виде:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} G_k(t) \quad (5)$$

где $x(t)$ – исходный сигнал;

$G_k(t)$ – k -я гармоника.

Под гармоникой в спектре Фурье будем подразумевать:

$$\begin{aligned} G_k(t) &= A_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_k}t + \varphi_k\right) = A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k) = \\ &= A_k \cdot \cos \varphi_k \cdot \cos(\omega_k t) - A_k \cdot \sin \varphi_k \cdot \sin(\omega_k t) \end{aligned} \quad (6)$$

где: ω_k – частота k -й гармоники;

φ_k – фаза k -й гармоники.

Выделим в (6) элементы, не зависящие от t , обозначим их как Re_k и Im_k :

$$\begin{aligned} G_k(t) &= \text{Re}_k \cdot \cos(\omega_k t) - \text{Im}_k \cdot \sin(\omega_k t) \\ \text{Re}_k &= A_k \cdot \cos(\varphi_k) \\ \text{Im}_k &= A_k \cdot \sin(\varphi_k) \end{aligned} \quad (7)$$

По величинам Re_k и Im_k можно однозначно восстановить амплитуду и фазу исходной гармоники:

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{\text{Im}_k}{\text{Re}_k}\right) \quad A_k = \sqrt{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2} \quad (8)$$

Запишем по формуле Эйлера:

$$X_k = \text{Re}_k + j \cdot \text{Im}_k = A_k \cdot e^{j\varphi_k} \quad (9)$$

♦ Преобразование Фурье

Преобразование Фурье связывает представление сигнала во временной (или по другой координате) области с его представлением в частотной области.

Преобразование Фурье непрерывного во времени комплексного сигнала:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \equiv F\{x(t)\} \quad (10)$$

Существует также обратное преобразование, то есть из частотной области во временную (или по другой координате):

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \cdot e^{j\omega t} \cdot d\omega \equiv F^{-1}\{X(\omega)\} \quad (11)$$

Достаточные условия осуществления преобразований – удовлетворение функций условиям Дирихле:

1) абсолютная интегрируемость сигнала

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty$$

2) конечность энергии сигнала

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty$$

Следующая функция описывает распределение энергии сигнала $x(t)$ по частоте, и называется спектральной плотностью мощности сигнала:

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X(\omega)|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \right|^2 \quad (12)$$

Для сигнала с конечной величиной энергии справедливо тождество:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(\omega)|^2 d\omega \quad (13)$$

- ♦ *Спектральная плотность функции автокорреляции и спектральная плотность функции взаимной корреляции*

Функция автокорреляции $K_{xx}(\tau)$ и спектральная плотность мощности сигнала $S_{xx}(\omega)$ связаны между собой преобразованием Фурье:

$$\begin{aligned} K_{xx}(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) \cdot e^{j\omega\tau} \cdot d\omega \\ S_{xx}(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} K_{xx}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} \cdot d\tau \end{aligned} \quad (14)$$

Следовательно, спектральная плотность автокорреляционной функции – это спектральная плотность мощности сигнала.

Аналогично, для функции взаимной корреляции:

$$K_{xy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xy}(\omega) \cdot e^{j\omega\tau} \cdot d\omega \quad (15)$$

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_{xy}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} \cdot d\tau$$

где $S_{xy}(\omega)$ – взаимная спектральная плотность мощности (взаимный спектр).

Следовательно, спектральная плотность функции взаимной корреляции – это взаимный энергетический спектр.

Функция взаимного спектра позволяет:

- оценить распределение по частотам взаимозависимость сигналов $x(t)$, $y(t)$;
- оценить передаточную функцию линейной модели объекта диагностирования при случайных входных возмущениях:

$$H(j\omega) = \frac{S_{xy}(j\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (16)$$

♦ Кепстральный анализ

Применение кепстрального анализа позволяет выделить отдельные составляющие сигнала в легко читаемые пики, что в некоторых случаях облегчает нахождение характерных гармонических составляющих в полигармоническом сигнале.

Комплексный кепстр:

$$c = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \log[S(\omega)] \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (17)$$

♦ Оконное преобразование Фурье

Оконное преобразование Фурье позволяет исследовать частотно-временное (или по другой координате) представление сигнала. То есть разбить сигнал на фрагменты и исследовать гармонический состав каждого из них.

$$X(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \quad (18)$$

где $w(t)$ - функция окна;

τ - величина сдвига функции окна.

Так как применение оконной функции вносит изменение в монотонность подынтегральной функции, то (в зависимости от выбранного типа окна) получаемое преобразование окажется в той или иной мере искаженным в связи с возникновением эффекта Гиббса. Величина вносимых искажений определяется по: ширине главного лепестка, уровню боковых лепестков относительно уровня главного лепестка, скорости спада боковых лепестков.

Рассмотрим характеристики некоторых наиболее часто используемых оконных функций. Ширина окна принята равной 64 отсчета.

- 1) прямоугольное окно (rectangular window):

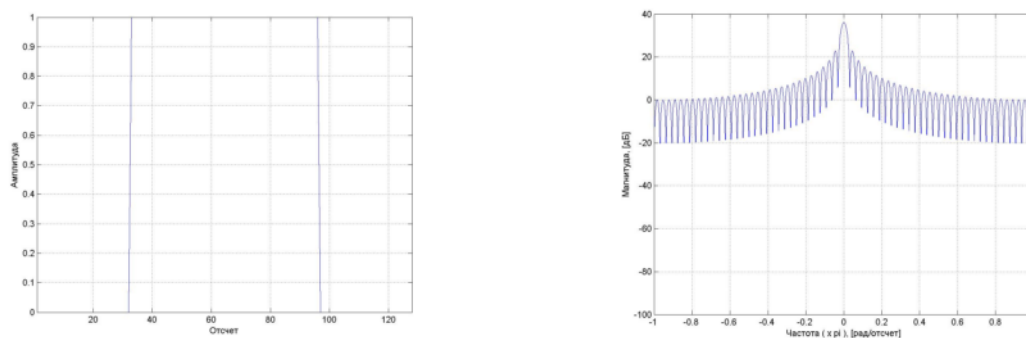


Рис. 1. График функции прямоугольного окна и её центрированный амплитудный спектр

относительный уровень боковых лепестков: -13,3 дБ

ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ: 0,0273 ($\times \pi$ рад/отсчет)

ширина полосы пропускания по уровню -6 дБ: 0,0376 ($\times \pi$ рад/отсчет)

2) треугольное окно (triangular window):

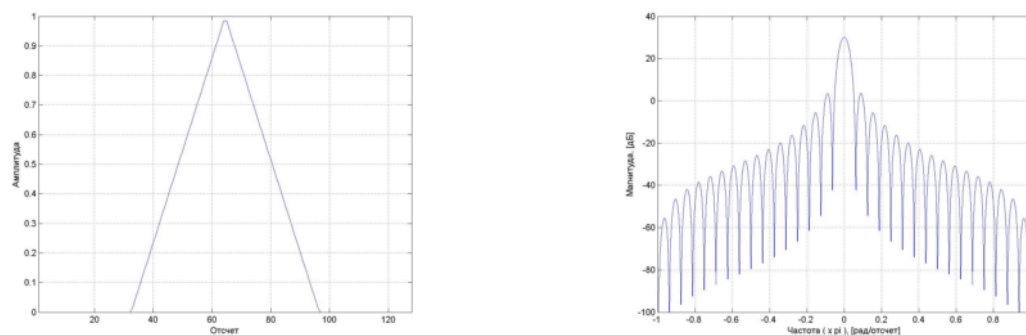


Рис.2. График функции треугольного окна и её центрированный амплитудный спектр

относительный уровень боковых лепестков: -26,6 дБ

ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ: 0,0391 ($\times \pi$ рад/отсчет)

ширина полосы пропускания по уровню -6 дБ: 0,0554 ($\times \pi$ рад/отсчет)

3) окно Ханна (косинус-квадрат, Hann window):

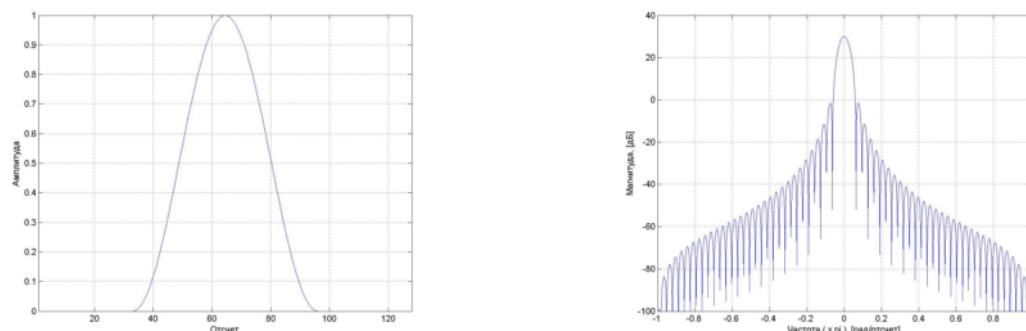


Рис. 3. График функции окна Ханна и её центрированный амплитудный спектр

относительный уровень боковых лепестков: -31,5 дБ

ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ: 0,0449 ($\times \pi$ рад/отсчет)

ширина полосы пропускания по уровню -6 дБ: 0,0632 ($\times \pi$ рад/отсчет)

4) окно Хэмминга (приподнятый косинус, Hamming window):

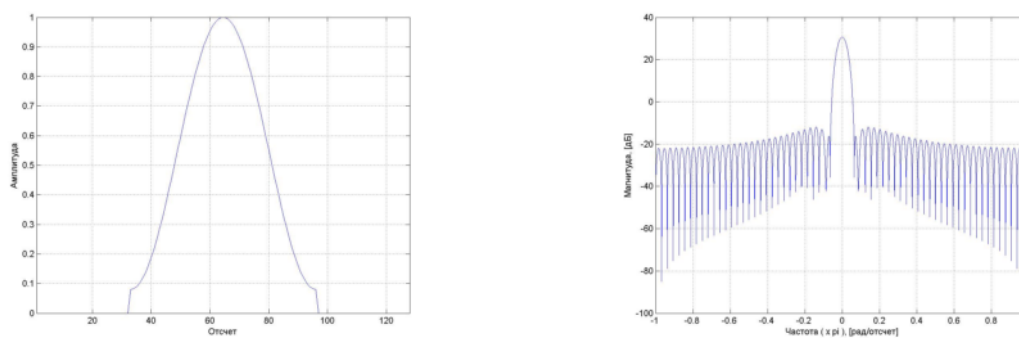


Рис. 4. График функции окна Хэмминга и ее центрированный амплитудный спектр

относительный уровень боковых лепестков: -42,4 дБ

ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ: 0,0410 ($\times \pi$ рад/отсчет)

ширина полосы пропускания по уровню -6 дБ: 0,0572 ($\times \pi$ рад/отсчет)

5) окно с гладкой вершиной (flat top window):

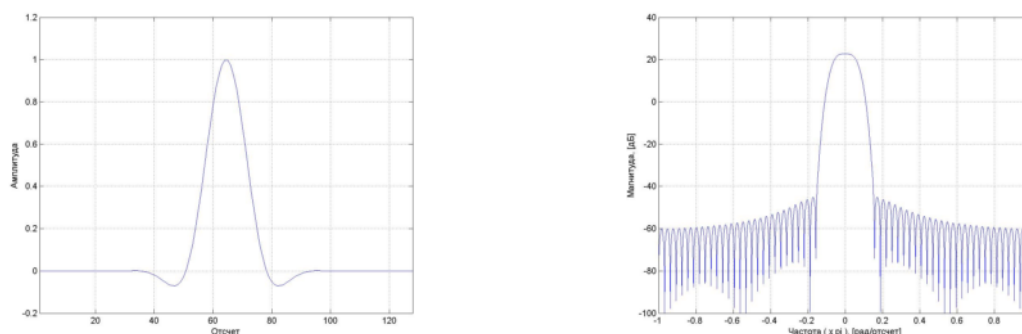


Рис. 5. График функции окна с гладкой вершиной и ее центрированный амплитудный спектр

относительный уровень боковых лепестков: -67,0 дБ

ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ: 0,1172 ($\times \pi$ рад/отсчет)

ширина полосы пропускания по уровню -6 дБ: 0,1456 ($\times \pi$ рад/отсчет)

6) окно Наттола (Nuttall window):

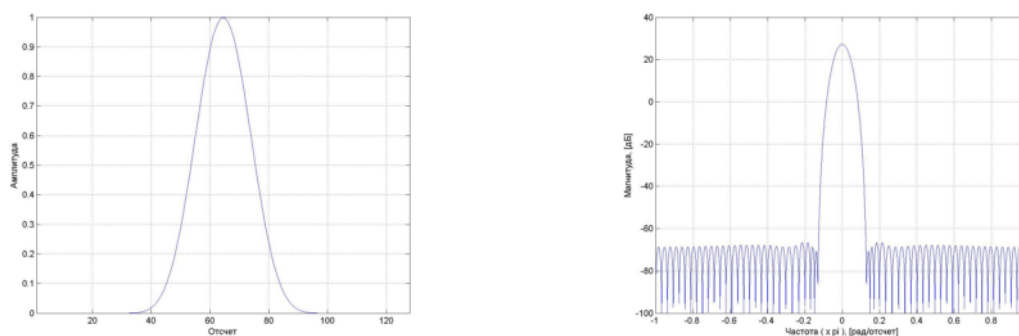


Рис. 6. График функции окна Наттола и ее центрированный амплитудный спектр

относительный уровень боковых лепестков: -93,8 дБ

ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ: 0,0586 ($\times \pi$ рад/отсчет)

ширина полосы пропускания по уровню -6 дБ: 0,0778 ($\times \pi$ рад/отсчет)

Для визуального сравнения основных характеристик приведенных оконных функций, сведём их в увеличенном масштабе на один график, который представлен ниже.

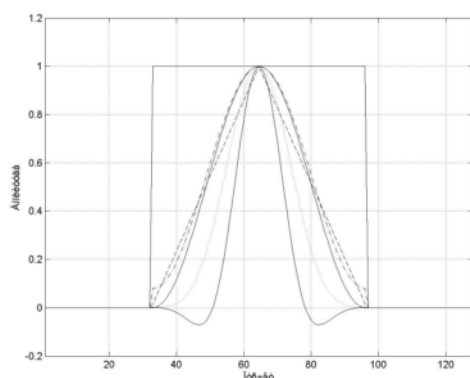


Рис. 7. Графики функций окна

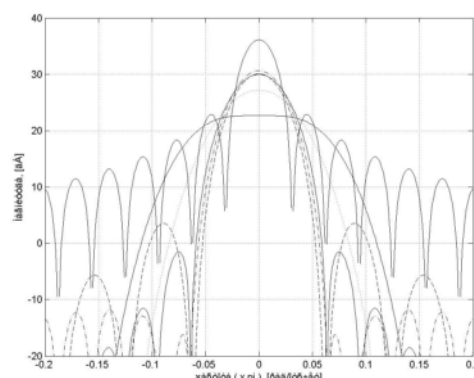


Рис. 8. Амплитудные спектры для шести оконных функций

Рассмотрим характерный пример – построение графика динамического спектра для полигармонического сигнала с переменным во времени гармонический составом.

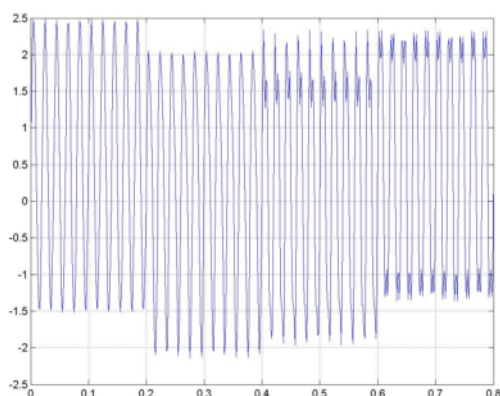


Рис. 9. График исследуемого полигармонического сигнала

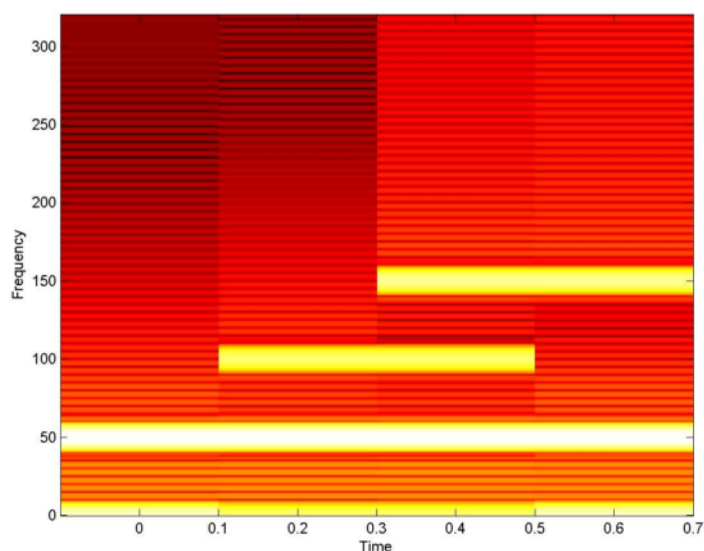


Рис. 10. Динамическая спектрограмма исследуемого сигнала с переменным во времени гармонический составом (более светлые тона соответствуют большей амплитуде гармонических составляющих)

Список литературы: 1. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. Отв. ред. Генкин М.Д. – М.: Наука, 1984. – 119 с. 2. Преобразование Фурье и классический цифровой спектральный анализ. Медведев С.Ю., к.ф.-м.н. http://www.vibration.ru/preobraz_fur.shtml/ 3. Витязев В.В. Спектрально-корреляционный анализ временных рядов: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. Ун-та, 2001. – 48 с. 4. Сигналы и линейные системы. Конспект лекций проф., доктора геолого-минералогических наук Давыдова А.В. <http://prodav.narod.ru/signals/index.html/>