

Баринов С.В., Куканова Н.А., Зайцев А.А., Павлушин А.А.
Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264 г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская, д. 23
boxb64@rambler.ru

Влияние деформационного упрочнения на коррозионную стойкость стали 30ХГСА

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) успешно и достаточно давно применяется для повышения механических и эксплуатационных свойств деталей машин. Однако на данный момент нет единого мнения о влиянии поверхностного пластического деформирования на коррозионную стойкость. Одна часть исследователей считает, что ППД способствует снижению коррозионной стойкости, другая – что обработка ППД повышает коррозионную стойкость. Разные виды ППД оказывают различное влияние на коррозионную стойкость разных материалов, либо остаются невыявленными технологические или внутренние факторы процесса, совокупность факторов или диапазоны их варьирования, оказывающие доминирующее влияние на коррозионную стойкость обрабатываемого материала.

Способ поверхностного пластического деформирования – волновое деформационное упрочнение (ВДУ), за счет большого числа управляемых технологических параметров достаточно эффективно может обеспечивать как равномерное, так и гетерогенное упрочнение изделий. Гетерогенное упрочнение достигается за счет неполного перекрытия отпечатков ударов инструмента при ВДУ и оценивается через коэффициент перекрытия K . Если $K=0$, то края отпечатков не перекрываются и граничат друг с другом; при $K=1$ инструмент бьет в одно и то же место, без смещения. В эксперименте ВДУ с разным коэффициентом перекрытия отпечатков ($K=0,3$ и $K=0,6$). Исследованию будут подвергаться образцы из стали 30ХГСА, так как она часто используется для изготовления ответственных изделий. Целью исследований является установление влияния деформационного упрочнения ВДУ на коррозионную стойкость стали 30ХГСА.

Исследование коррозионной стойкости выполнялось на установке для проведения коррозионных испытаний в соляном тумане, оценивалась потеря массы образцов после испытаний на коррозионную стойкость на высокоточных весах. Также определялись степень и глубина упрочнения.

В результате исследований установлено, что неупрочненные образцы из стали 30ХГСА имели твердость HV равную 1540 МПа, потери в результате исследований коррозионной стойкости – $6,7 (\times 10^{-5})$ г/мм³. После упрочнения с $K=0,3$ в поверхностном слое степень и глубина упрочнения – соответственно 38 % и 7 мм. Потери равнялись $4,7 (\times 10^{-5})$ г/мм³. При упрочнении с $K=0,6$ в поверхностном слое степень упрочнения составила 43 %, а глубина упрочнения 7 мм. Потери в результате исследований коррозионной стойкости равнялись $4,5 (\times 10^{-5})$ г/мм³. Таким образом, с увеличением степени упрочнения с 38 до 43%, по сравнению с неупрочненным материалом, коррозионная стойкость упрочненных образцов выросла с 29 до 33%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00666, <https://rscf.ru/project/24-29-00666/>

Литература

1. Федонин, О. Н. Технологическое обеспечение коррозионной стойкости деталей из конструкционных сталей в условиях электрохимической коррозии: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Федонин Олег Николаевич. – Брянск, 2004. – 320 с.
2. Киричек А.В. Исследование влияния волнового деформационного упрочнения на коррозионную стойкость / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.А Зайцев [и др.] // Вестник машиностроения. 2024. № 12 С.1003-1007

Борисова Е.А.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264 г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская, д. 23
armitp@yandex.ru*

Состояние вопроса повреждаемости гребней колесных пар, методы снижения их износа

Железные дороги Российской Федерации являются важнейшим стратегическим объектом. В процессе эксплуатации колёсные пары локомотива подвергаются постепенному изнашиванию, приводящему к изменению геометрических параметров бандажа – элемента колесных пар, а также к образованию его дефектов, среди которых выделяют вертикальный подрез гребня, прокат по кругу катания, ползуны, остроконечный накат и д.р.

Известно, что качение колес по рельсам сопровождается их проскальзыванием, вызывающим силу трения скольжения. Удельное сопротивление от трения скольжения представляют в виде суммы, H :

$$k_3 = k_3^I + k_3^II + k_3^III + k_3^{IV}, \quad (1)$$

где k_3^I – конусность бандажей; k_3^II – влияние колесных пар в рельсовой колее; k_3^III – неравенство диаметров колес одной колесной пары; k_3^{IV} – неточность установки колесных пар в раме тележки [1].

В работе [2] выделяются первичные и вторичные факторы, влияющие на повреждаемость колес и безопасность движения поездов. К первичным факторам автор относит значение твердости и структуру поверхностного слоя колесной и рельсовой стали; вес вагона и давление в пятне контакта колеса и рельса; температуру окружающей среды; величину проскальзывания колеса по рельсу; радиусы кривизны пути; скорости качения и др. Отмечается, что бороться различными способами с дефектами, связанными с равномерным износом по кругу катания не представляется целесообразным, так как простой переточкой колес удаляются зародыши усталостно-контактных повреждений. Особое внимание необходимо уделять дефектам гребня колеса.

Проскальзывание гребня бандажа относительно рельса приводит к интенсивному изнашиванию контактирующих поверхностей. Вертикальный подрез гребня бандажа является преобладающим типом дефектов рассматриваемого элемента колесных пар, имеет контактно-усталостный характер и считается наиболее опасным, т.к. в процессе изнашивания изменяются очертания профилей колеса и рельса, что напрямую оказывает влияние на безопасность движения [3].

На сегодняшний день существует несколько способов снижения износа рабочих поверхностей колес, среди которых наиболее распространенными являются: упрочнение поверхностного слоя части гребня бандажа плазменной, лазерной, электроконтактной термообработкой; уменьшение коэффициента трения за счет добавления смазки в зону взаимодействия колеса с рельсом. Однако, наряду с неоспоримыми достоинствами данные способы имеют и недостатки. Так, например, при плазменном упрочнении, позволяющем достигать значений микротвердости поверхностного слоя около 1000 HV, возникают зоны с высокими остаточными растягивающими напряжениями [4], что в совокупности с внешними напряжениями, возникающими во время движения локомотива, может приводить к

возникновению дефектов, таких как сколы, выщербины, трещины, что является недопустимым [5, 6]. Лазерная обработка даёт низкий уровень напряжений и деформаций, вносимых в изделие, имеет высокую скорость обработки, возможность локальной обработки поверхности, сохранение геометрии обрабатываемой детали и т.д., но лазерные комплексы имеют достаточно высокую стоимость.

Применение лубрикации в зоне контакта колеса и рельса позволяет значительно замедлить износ, снизив коэффициент трения, однако это ведет к возникновению контактно усталостных дефектов, которые возникают только лишь в условиях смазки [7].

Таким образом, в настоящее время не существует универсальных способов снижения износа гребней колесных пар, приводящего к большим материальным потерям. Все они являются лишь частью комплекса мер, применяемых на железной дороге с целью уменьшения износа рабочих поверхностей, в связи с чем, изучение данного вопроса до сих пор остается актуальным.

Литература

- 1 Осипов И.С., Осипов С.С., Феоктистов В.П. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. СИ. Осипова. – М.: Маршрут . 2006. – 436 с.
2. Марков, Д.П. Трибологические характеристики колесно-рельсовой пары трения // Трение и износ. – 1995. – Т16. – N1. – С. 138-156.
3. Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп. /И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др.; Под ред. И.В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
4. Киселев, С.Н., Саврухин, А.В., Кузьмина, Г.Д. Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное и структурное состояние гребней бандажей колес локомотивов // Сварочное производство. –2001. – №6. – С.9–17.
5. Марков, Д.П. Закалка гребней колес подвижного состава на высокую твердость для снижения бокового износа // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – №. 1. – С. 36–42.
6. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. Приказом Министерства транспорта РФ от 23.06.2022 № 250. – URL <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1827> (дата обращения 01.11.2024).
7. Шмелев С.А., Богданов А.В. Современное состояние вопроса повреждаемости гребней колесных пар и методы снижения их износа и контактной усталости / Научноёмкие технологии в машиностроении, № 9. – 2018. С.14-20.

Волченков А.В.

Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д. 23

Методика прогнозирования предела текучести по величине начальной пластичности

Максимальное контактное напряжение зависит от свойств материала и микрогеометрии. По сути, контактное напряжение зависит от измерительного оборудования, микрогеометрии и образцов для измерений, причем последние два параметра, обычно регламентированы.

Для решения этой задачи предположим, что изначально микронеровности подвергаются пластическому передеформированию и затем контакт переходит в упругую фазу. После обкатки контакт должен быть упругим. Адекватная эволюция определяется по тому, какая шероховатость необходима для создания соответствующего напряжения в контактной области, которая не выше значений схватывания, а характеристики поверхности должны определяться как функции этой микрогеометрии.

Чтобы определить, происходит ли изменение шероховатости, определяется максимальное сдвиговое усилие в разных точках площади контакта. Эти величины нормируются физико-механическими свойствами материалов в контакте, условиями смазки, значениями внешних нагрузочных факторов. Напряжения определяются по микротвердости материала вблизи и под поверхностью более мягкого материала. Анализ соотношения различных величин геометрии и площади контакта A_p при трансформации выше напряжений разрушения показывает что они связаны по линейному закону.

Используемые при расчете поверхности взяты из измеренных образцов. Разброс полученных данных свидетельствует о наличии предела возможности изменения микротвердости, этот диапазон изменяется в 1,5 раза при превышении стандартных отклонений измеренной шероховатости. Первоначальный размер площади контакта имеет большее значение и не может быть выше предельного напряжения по сравнению с измеренной микрогеометрией. Трендом является подобная тенденция для каждого рассматриваемого сопряжения. Поверхность будет трансформирована, если последующие контакты являются упругими.

Стандартная волнистость, определяемая на соответствующей поверхности, указывает на состояние поверхностей после измерения. На стенированной поверхности, максимальные усилия смещения видны в начале поверхности, а минимальные усилия от номинального контакта происходят примерно на той же площади при сравнении поверхностных характеристик от шероховатой поверхности. Контактное усилие обычно происходит более мягко и содержит несколько следов контакта.

Начальная поверхность, где формируется микрогеометрия, отличается от поверхности после механической обработки, например как после тонкого шлифования или хонингования. Необходимо регламентировать участки, где возможно будет осуществляться трансформация. Определение физико-механических и внутренних напряжений позволяет определить места, где ожидается трансформация поверхности, эта область находится над участками, в которых сдвиговые напряжения превышают критическое для данного материала значение. Удовлетворительные результаты сравнения прогнозирования и фактическими измеренными параметрами поверхностей позволяют констатировать адекватность применённой методики для

проектирования оптимальных условий проведения трансформации поверхностей для тяжелых условий эксплуатации, таких как зубчатые колеса различной геометрии, ведущие валы и кривошипы гусеничной техники, детали цилиндропоршневой группы энергонасыщенных двигателей внутреннего сгорания.

Литература

1. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. под ред. *И.В. Крагельского, В.В.Аликина*. 1978, Москва. Машиностроение, 400 с.

Зелинский В.В., Борисова Е.А., Сучилин Д.Н.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д. 23
armitp@yandex.ru*

Современное состояние теории адгезионного изнашивания

Адгезионное изнашивание является основным видом изнашивания, поскольку он в той или иной степени проявляется во всех случаях контакта трущихся поверхностей. Обширные исследования адгезионного изнашивания деталей трущихся сопряжений в машинах проведены отечественными и зарубежными учеными-трибологами (С.Б. Айнбиндер, Б.И. Костецкий, Д. Арчард, Д. Тейбор и др.).

Известны различные трактовки кинетики и механизма протекания процесса, предложены разные названия этого вида изнашивания: молекулярный, молекулярно-механический, тепловой, изнашивание при схватывании [1]. Но основным признаком его остается неизменным – адгезионное взаимодействие сопряженных поверхностей и последующий вырыв частиц из менее прочной поверхности в результате их совместного пластического деформирования под действием нормальной и касательной нагрузок.

Действительно, любые металлические поверхности имеют субмикровыступы, на вершинах которых местные давления могут оказаться достаточными для обеспечения пластической деформации. При этом обнажаются новые химически чистые поверхности и металлы вступают в контакт под действием сил химических связей, образуя прочные адгезионные соединения.

Анализ механизмов адгезионного изнашивания приводит к выводу о том, что в его основе лежит явление схватывания металлов. Схватыванию препятствуют поверхностные пленки различного происхождения. Для начала схватывания необходима пластическая деформация, которая разрушила бы поверхностные пленки и привела к образованию ювенильных участков поверхности. Порог схватывания определяется как механическими свойствами поверхностного слоя металла, так и механическими свойствами пленки. Например, окисные пленки как более хрупкие, разрушаются при меньших деформациях, чем масляные.

К настоящему времени окончательно сформирована адгезионная теория схватывания, которая благодаря работам А.П. Семенова, С.Б. Айнбиндера, Н.А. Буше, И.В. Крагельского и других стала общепризнанной. Электронная, диффузионная, энергетическая и другие теории схватывания лишь разъясняют отдельные особенности адгезионной теории.

Основные положения адгезионной теории схватывания сводятся к следующему.

1. Большинство металлов образуют прочные соединения при соприкосновении чистых (ювенильных) поверхностей. При схватывании происходит выделение энергии. В реальных условиях схватыванию препятствуют поверхностные пленки.

2. Ювенильные поверхности образуются в результате сдвига соприкасающихся неровностей в местах действительного контакта, площадь которых может составлять лишь доли процента от номинальной площади. При этом возникают мостики холодной сварки (адгезионные мостики).

3. В ряде условий (наклеп, стеснение пластических деформаций, наличие твердых интерметаллидов и др.) сдвиг происходит не по границе раздела, а по менее прочному материалу и сопровождается переносом материала.

4. Существует критическая пластическая деформация, при которой создается критическая плотность адгезионных мостиков, что приводит к множественному схватыванию, образованию адгезионного шва.

5. Порог схватывания определяется как свойствами материалов, так и свойствами поверхностных пленок.

Приведенным положениям соответствуют результаты исследований адгезионного изнашивания трущихся сопряжений, приведенные во многих публикациях по трибологии, основные выводы из которых могут быть сформулированы в терминах относительной прочности адгезионного соединения, формируемого в процессе скольжения:

- если соединение более слабое, чем прочность какого-либо из металлов, тогда оно срезается по границе раздела между металлами;
- если соединение более слабое, чем прочность одного из металлов, но прочнее другого, тогда срез происходит по более мягкому металлу и продукты изнашивания остаются на поверхности твердого металла;
- если соединение прочнее каждого из металлов, то срезаются оба металла и повреждаются обе поверхности.

С учетом первостепенной роли пластической деформации в адгезионной теории схватывания заслуживает внимания концепция английской трибологической школы, в соответствии с которой начало схватывания нормируется строгой математической взаимосвязью (аналогичному критерию текучести) нормального и касательного напряжений с пределом текучести при сдвиге менее прочного из материалов. Несмотря на простоту, отсутствие учета деформационного упрочнения и особенностей развития повреждения эта зависимость имеет фундаментальное значение, так как связывает важнейшие факторы напряженного состояния поверхностного слоя при трении.

В соответствии с современной (и самой поздней) интерпретацией адгезионного изнашивания [2] разрыв образовавшейся связи происходит по плоскостям максимальных касательных напряжений, проходящим по телу микровыступов. Причем линии скольжения не совпадают с адгезионным швом. При сдвиге зона пластически деформированных материалов сопряженных поверхностей несколько затормаживается и локализуется в линзообразной области. При этом в зоне пластического деформирования происходит массоперенос, связанный с изменением направления структурных волокон материала.

При продолжении сдвига в образовавшемся адгезионном соединении разноименных материалов происходит смещение линий скольжения к адгезионному шву. Поэтому, если один или оба материала вблизи адгезионного шва не испытывают всестороннего сжатия и имеют возможность перемещаться, заторможенная область стягивается в компактный узел, ограниченный линиями максимальных касательных напряжений, и приобретает вращательное движение. При этом возникший конгломеративный микрообъем утрачивает связь с основными материалами и превращается в частицу износа.

В развитие теории вводится понятие адгезионной совместимости для жесткопластического тела. Для реализации совместимости необходимо преодолеть определенный энергетический порог, для чего поверхности должны иметь достаточную энергию, поставляемую путем механоактивации и/или нагрева. Отмечается, что адгезионный шов образуется только при отсутствии смазочных пленок и окислов. При их наличии пластическое течение локализуется в тонком поверхностном слое без схватывания. Для разрушения разделительных пленок требуется определенная нагрузка и температура.

В заключение следует отметить следующее. Анализ и сравнение подходов технологической школы и ученых-трибологов в оценке и описании явлений адгезионного изнашивания позволяет сделать два важных вывода:

1) к настоящему времени верхний нагрузочный порог адгезионного взаимодействия поверхностей пересмотрен в сторону снижения и им является предел текучести при сдвиге.

2) в механизмах возникновения и развития адгезионной связи используются критерии и модели поведения материалов, применяемые в теории пластичности, что указывает на исключительную важность математического описания теории адгезионного изнашивания.

Литература

1. ГОСТ 27674-88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения [Текст]. – Взамен ГОСТ 23.002-78. – Введ. 01.01.89. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 19 с.

2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе.- М.: Машиностроение, 2003.- 576 с.

Карпов А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д. 23
krash75@mail.ru*

К вопросу выбора стратегии механической обработки заготовок с использованием энергетического критерия

Современная технология машиностроения располагает значительным разнообразием способов, методов и приёмов механической обработки заготовок деталей машин обработки, станков и инструментов, что обеспечивает решение широкого круга технологических задач. Учитывая дороговизну материальных и энергетических ресурсов, при выборе стратегии обработки один из ключевых вопросов – в том, во что обойдётся изготовление изделия заданной конструкции в конкретных производственных условиях. Этому вопросу постоянно уделялось небольшое внимание.

Ранее, в эпоху стабильности и предсказуемости экономических показателей, к его решению подходили, в основном, с позиций обеспечения минимального значения экономического критерия - технологической себестоимости обработки. Наряду с указанным критерием, в настоящее время необходимо принимать во внимание адекватный физический критерий оценки эффективности стружкообразования – величину удельной работы, совершаемой режущим клином инструмента, необходимой для осуществления каждого технологического воздействия. Практика машиностроительных предприятий доказывает, что доля энергозатрат в структуре себестоимости изделий, в среднем, составляет 20-30%. Высокая величина этих показателей вынуждает отечественные предприятия разрабатывать меры по снижению энергозатрат на производство, т.е. стремиться к экономически приемлемому уровню энергоёмкости продукции. Анализ ситуации выявил несколько альтернативных подходов к решению этой задачи: изменить конструкцию детали; применить новые прогрессивные технологии; совершенствовать существующие технологические процессы путём изменения стратегии обработки. Наиболее доступным представляется третий вариант. Нами проведено сравнение возможных вариантов технологического процесса изготовления конкретных деталей машин по критерию минимальных удельных энергозатрат.

Для апробации методики выбран наиболее широко распространённый тип деталей машин – вал. Процесс изготовления вала включает в себя ряд технологических операций, каждая из которых обеспечивает формирование конкретной поверхности, начиная с заготовительной и заканчивая финишной обработкой. Та или иная операция может быть осуществлена как различными технологическими методами, так и различными способами в пределах одного и того же технологического метода.

Выбор стратегии обработки поверхности (т.е. выбор технологического метода, способа, приёма, режима) может быть получен путём проведения структурной и параметрической оптимизации технологического процесса. Она заключается в определении оптимальных управляемых параметров в рамках одного метода формирования конкретной поверхности детали. В качестве целевой функции оптимизации выбрана зависимость удельных энергозатрат стружкообразования от управляемых условий обработки – глубины резания, подачи, скорости резания, материала и геометрии инструмента – с учётом системы ограничений, которые выражаются в

технологических требованиях, предъявляемых к оборудованию, инструменту, технологической оснастке.

Литература

1. Карпов А.В. Модель параметрической оптимизации операций обработки резанием по критерию наибольшей энергетической эффективности // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 6-1. – С. 50-55; URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=38070> (дата обращения: 30.12.2023). iew?id=38031 (дата обращения: 03.01.2024).

Карпов А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д. 23
krash75@mail.ru*

О принципах построения энергетически эффективных процессов механической обработки

Машиностроение характеризуется высоким коэффициентом электрификации рабочего оборудования и значительным (до 30-40 %) количеством электроэнергии, расходуемой на технологические цели. Снижение уровня энергоёмкости продукции предполагает наличие методов и средств экономии энергии по цепи: питающая сеть → преобразователь электрической энергии в механическую → процесс резания и его параметры → обработка информации о ходе технологического процесса в режиме реального времени → контроль и адаптация режима резания.

Технологические мероприятия, направленные на снижение работы стружкообразования, должны базироваться на комплексной методике повышения энергетической эффективности эксплуатации режущих инструментов. Для создания такой методики представляется целесообразным рассмотреть резание металлов с позиций термодинамики и теории распространения трещин в твердом теле, чтобы на основе физических закономерностей контактирования обрабатываемого и инструментального материалов сформулировать критерии количественной оценки энергетической эффективности процессов удаления припуска и образования новых поверхностей детали. Показатель энергетической эффективности был записан нами в виде «КПД резания»:

$$K = \frac{\Delta W}{A_{\text{рез}}} = \frac{\Delta w}{e}, \quad (1)$$

где ΔW – полезная энергетическая составляющая, ответственная за процессы срезания припуска или образования новой поверхности детали; $A_{\text{рез}}$ – общая работа резания; Δw , e – соответственно удельные значения величин ΔW и $A_{\text{рез}}$ по отношению к единице объема срезаемого слоя.

Учитывая, что лезвийная обработка включает нарушение сплошности обрабатываемого материала за счёт определённой части работы инструмента, полезную составляющую ΔW энергетического баланса процесса резания можно рассмотреть как удельную энергоёмкость обрабатываемого материала, т.е. как предельный уровень поглощённой энергии, при котором наступает разрыв сплошности и отделение одной части материала от другой. Анализ концепций разрушения твёрдых тел показал, что в настоящее время отсутствует единый критерий, который бы связывал предельное состояние конструкционного материала с режимами его механической обработки и эксплуатации. Нами получено и исследовано выражение показателя энергетической эффективности предварительных переходов технологического процесса механической обработки, на которых расходуется наибольшее количество энергии:

$$K = \frac{1,5 \sigma_B}{1 - 1,7 \psi_B} \left(1 - \frac{T}{T_s} \right) \frac{P_V}{N} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где σ_B , ψ_B – механические характеристики материала; P_V – объём стружки, удаляемый в единицу времени; N – мощность резания; T – температура; T_s – точка плавления материала заготовки.

Литература

1. Карпов А.В., Соколик Н.Л., Соколик А.И. К вопросу снижения энергозатрат при обработке заготовок лезвийными инструментами // Новые материалы и технологии в машиностроении. Сборник научных трудов. Выпуск 2. – Брянск: БГИТА, 2003. – С. 48-51.

Фуртак А.А., Боос И.Ю., Константинов М.А.
 Сибирский Федеральный университета. Институт цветных металлов
 660025, г. Красноярск, пр. Вузовский, 3, ауд. 415 у.к.
 furtak.anna@mail.ru

Исследование влияние погрешности определения прочностных характеристик (ρ и k) на коэффициент запаса устойчивости

Для исследования взяты следующие данные :

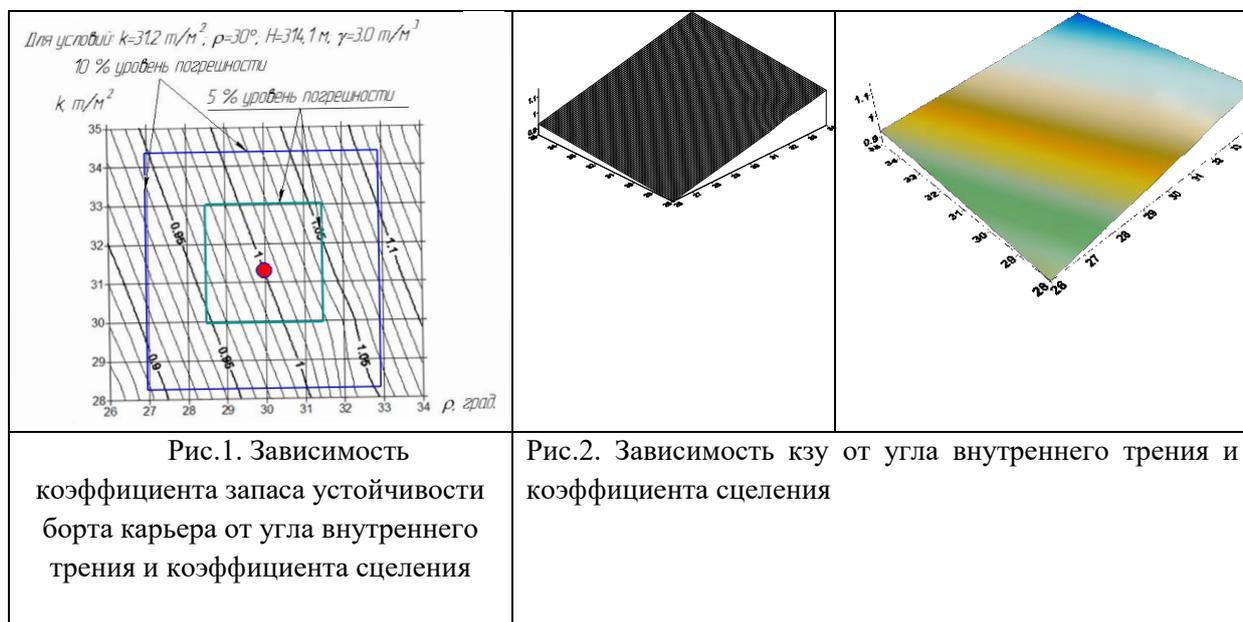
- борт карьера Кия-Шалтырского нефелинового рудника высотой $H=314.1$ м;
- угол наклона борта карьера $\alpha = 45,5^\circ$; - коэффициент сцепления $k = 31,2$ т/м²; k
- угол внутреннего трения $\rho = 30^\circ$. Это средние показатели по руднику.

Принимая погрешность определения коэффициента сцепления и угла внутреннего трения $\pm 10\%$ от средних построим возможную матрицу значений .

Для автоматизации расчетов по определению параметров и оценки устойчивости карьерных откосов нами использовалось специальное программное обеспечение (ПО) [1] .

Для каждой узловой точки матрицы вычислялся коэффициента запаса устойчивости (кзу). Результаты расчетов матрицы не представлены, но по ней для полученных предельных значений (кзу.) построены изолинии (кзу). рис.1 и объемные модели этой матрицы рис.2.

Задача решалась при условии, что $\alpha = 45,5^\circ$; $\gamma = 3,0$ т/м³. Значения ρ меняется от 26° до 34° , то есть в пределах 10% от среднего, равного 30° , через 1° , а коэффициент сцепления изменяется от 28 т/м² до 35 т/м², то есть в пределах $\pm 10\%$ от среднего $31,2$ т/м².



В расчетной матрице на изолиниях нанесены прямоугольники с размерами 5% и 10% погрешностей (k и ρ) (рис. 1).

Анализ полученных построений позволяет сделать следующие выводы:

Затраты на проведение исследований по определению прочностных характеристик значительны, но они намного меньше чем корректировка борта карьера и последствия этого изменения.

Необходимо отметить, что аналогичные исследования можно провести для любых строк или любых столбцов матрицы. Нет никаких трудностей спроектировать другую матрицу для любых исходных данных.

Анализ матрицы (рис. 1) показывает, что любое сочетание ρ и k , находящееся левее изолинии 1.0 приведет борт карьера к неустойчивому состоянию, а правее ее к повышению устойчивости борта карьера.

Анализ полученных построений позволяет сделать следующие выводы:

Если делается максимальная ошибка в определении ρ и k .

По матрице (рис.1) для погрешности 10%.

Минимальное значение $k_{зу}=0,890$, максимальное значение $k_{зу} = 1,115$.

По матрице (рис.1) для погрешности 5%.

Минимальное значение $k_{зу} = 0,948$, максимальное значение $k_{зу} = 1,060$.

Т.е. получаем,

$$\text{Для погрешностей 10\% } k_{зу} = 1,000 \frac{+0,115}{-0,110}, \text{ Для погрешностей 5\% } k_{зу} = 1,000 \frac{+0,060}{-0,052},$$

м.

Любое сочетание прочностных характеристик k и ρ попадающих на плоскость матрицы левее изо $k_{зу} = 1.000$ приводит к уменьшению коэффициента запаса устойчивости борта карьера, т. е требуется корректировка борта в сторону снижения высоты или уменьшения угла наклона борта карьера..

Любое сочетание прочностных характеристик k и ρ попадающих на плоскость матрицы правее изо $k_{зу} = 1.000$ приводит к увеличению коэффициента запаса борта карьера, т. е требуется корректировка борта. Может быть три варианта: увеличение высоты борта при неизменном угле наклона; увеличение угла наклона борта карьера при неизменной высоте борта карьера; все оставить без изменения с целью увеличения $k_{зу}$. борта карьера.

Рассмотрим случай, когда погрешность допущена только в одном показателе, при изменении другого.

Рассмотрим случай когда $k=31,2 \text{ т/м}^2 \text{ cons}$, а ρ изменяется в пределах $\pm 10\%$.

По матрице (рис.1) для погрешности 10%.

Минимальное значение $k_{зу} = 0,920$, максимальное значение $k_{зу} = 1,080$.

По матрице (рис.1) для погрешности 5%.

Минимальное значение $k_{зу} = 0,960$, максимальное значение $k_{зу} = 1,040$.

Т.е. получаем,

$$\text{Для погрешностей 10\% } k_{зу} = 1,000 \frac{+0,080}{-0,080}, \text{ м. Для погрешностей 5\% } k_{зу} = 1,000 \frac{+0,040}{-0,040}.$$

Рассмотрим случай когда $\rho = 30^\circ = \text{cons}$, а k изменяется в пределах $\pm 10\%$.

По матрице 1 (рис.1) для погрешности 10%.

Минимальное значение $k_{зу} = 0,970$, максимальное значение $k_{зу} = 1,030$.

По матрице 1 (рис.5.5) для погрешности 5%.

Минимальное значение $k_{зу} = 0,990$, максимальное значение $k_{зу} = 1,020$.

Т.е. получаем,

$$\text{Для погрешностей 10\% } k_{зу} = 1,000 \frac{+0,030}{-0,030}, \text{ м. Для погрешностей 5\% } k_{зу} = 1,000 \frac{+0,020}{-0,010}, \text{ м.}$$

Рассмотрим только отрицательное влияние в разнице изменения приращения коэффициента запаса из-за погрешности ρ и k (в %). Для погрешностей в 10% $q = 0,08/0,03=2,66$.

Для погрешностей в 5% $q = 0,04/0,01 = 4,0$.

Т.е. изменение прироста кзу из-за ошибки в определении сцепления больше чем в 2 раза по сравнению с такой же ошибкой определения угла внутреннего трения (в %).

Вывод. При проектировании и расчёте устойчивости бортов карьеров необходимо пользоваться программами позволяющие вести расчет с погрешностью не грубее 0,001.

Изменение прироста (увеличение, уменьшение) коэффициента запаса устойчивости из-за ошибки в определении сцепления для погрешностей в 10% составляет в $q = 2,6$ раза., а для погрешностей в 5% составляет в $q = 4$ раза по сравнению с такой же ошибкой определения угла внутреннего трения (в %, рассматривается только отрицательно влияющая сторона). Значит параметры коэффициента сцепления необходимо определять значительно точнее и надежнее чем угла внутреннего трения.

3. Изменение прироста (увеличение, уменьшение) кзу из-за ошибки в определении сцепления для погрешностей в 10% составляет $q = 2,66$, а для погрешностей в 5% $q = 4$ по сравнению с такой же ошибкой определения угла внутреннего трения (в %).

4. Разработанная методика построения изокз, позволяющая установить границы разделяющие плоскость матрицы при любом сочетании прочностных характеристик массива борта карьера k и ρ , на устойчивую область и неустойчивую область, т.е. определять прочностные характеристики при которых требуется корректировка борта карьера

5. Анализ матрицы говорит о том, что небольшое изменение кзу (в пределах 0,01) может привести к значительному изменению высоты до 30м.

Затраты на проведение исследований по определению прочностных характеристик значительны, но они намного меньше чем корректировка борта карьера и последствия этого изменения.

Поэтому при проектировании и расчёте устойчивости бортов карьеров необходимо пользоваться программами позволяющие вести расчет с погрешностью не грубее 0,001.

Литература

1. Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л., Шпакова М.В., Фролов И.А. Программа для расчета устойчивости карьерных откосов "Stability analysis". «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». ПРОГРАММЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В РЕЕСТРЕ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. RU ОБПБТ № 4(75) 20.12.2010 Программы для ЭВМ. Рег. номер 2010614557 (09.07.2010). с.70.

Шпаков П.С.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264 г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская, д. 23
spsp01@rambler.ru*

Юнаков Ю.Л.

*Сибирский Федеральный университет. Институт цветных металлов
660025, г. Красноярск, пр. Вузовский, 3, ауд. 415 у.к.
JJunakov@sfu-kras.ru*

Методика расчета параметров бортов карьера с учетом укрепления

Сущность предлагаемой методики состоит в создании упрочненного пояса вдоль борта карьера, создаваемого в области поверхности скольжения с минимальным коэффициентом запаса устойчивости.

При заданной проектной высоте откоса H определяют его угол наклона, при котором за счет естественной прочности массива обеспечивается коэффициент запаса устойчивости, равный $n_{пр}$.

При фиксированной проектной высоте борта его угол наклона с некоторым шагом увеличивается. Для каждого варианта геометрии борта строится семейство линий скольжения, для каждой из которых производится расчет коэффициента запаса устойчивости по известным методикам. По результатам расчета строится диаграмма устойчивости борта (рис. 1).

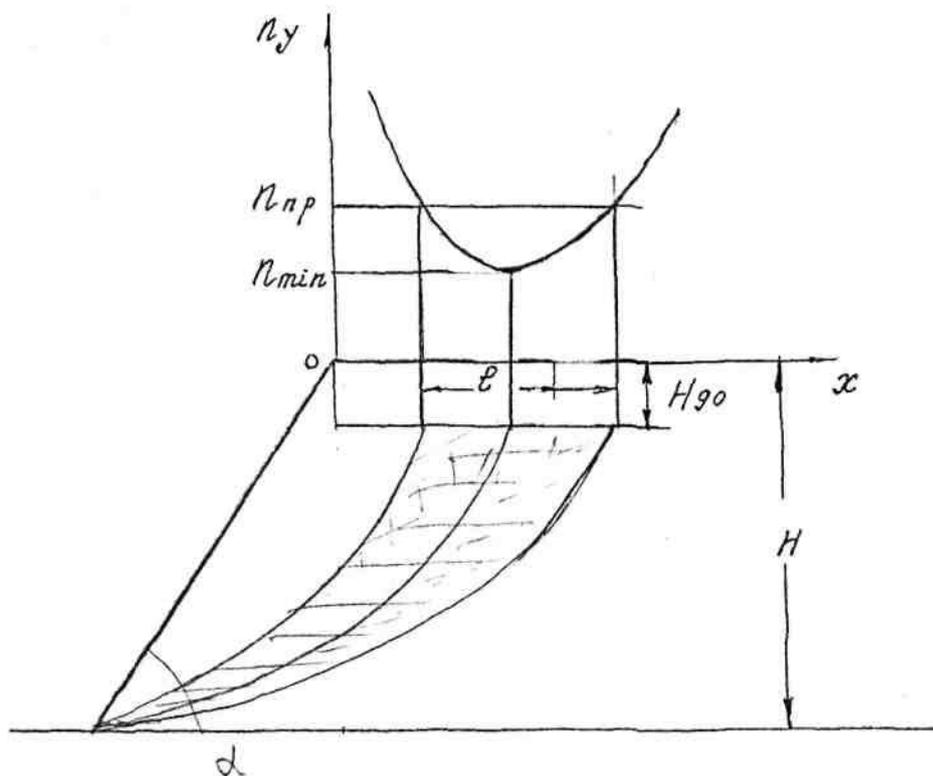


Рис. 11. Схема к определению зоны, где по результатам расчетов коэффициента запаса устойчивости n_y требуется упрочнение массива горных пород

Определяют границы зоны, которая подлежит упрочнению. Она ограничена двумя поверхностями: одна – поверхность, начиная от которой коэффициент запаса устойчивости принимает значения ниже, чем проектный $n_{пр}$, другая – за пределами которой коэффициент запаса устойчивости принимает значения больше, чем проектный $n_{пр}$.

По результатам расчета устойчивости борта по различным вариантам определяют, следующие параметры:

Ширина зоны по земной поверхности, где коэффициент запаса ниже, чем $n_{пр}$;

$V=(H-H_{90})l/2$ – объем зоны, где требуется упрочнение массива;

$\Delta T_i = (n_{пр} - n_i) \cdot \sum T_i$ дефицит удерживающих сил по i -той поверхности скольжения; n_i – расчетный коэффициент запаса устойчивости по i -той поверхности скольжения;

L_i – длина i -той линии скольжения;

$\Delta \kappa_i = \Delta T_i / L_i$ – требуемая величина прироста сцепления массива за счет проведения мероприятий по упрочнению массива для того, чтобы по i -той поверхности скольжения коэффициент запаса устойчивости n_i увеличился до заданного проектного значения;

$K_y = \kappa_y / \kappa = (\kappa + \Delta \kappa_i) / \kappa$ – требуемый коэффициент упрочнения массива равный соотношению сцепления в упрочненном κ_y и исходному κ массиве горных пород.

Далее методика оптимизации параметров системы разработки сводится к следующему:

строится зависимость снижения затрат на вскрышу по результатам расчетов снижения объемов вскрыши при увеличении угла наклона борта за предел его естественной устойчивости;

в интервале заданных углов наклона откоса ищутся зависимости объемов, подлежащих упрочнению, и требуемых коэффициентов упрочнения массива от угла наклона борта;

по найденным зависимостям объемов и коэффициентов упрочнения строится зависимость затрат на мероприятия по увеличению прочности массива смолоинъекцией от угла наклона откоса;

по разности экономии затрат на вскрышу и затрат на упрочнение массива определится прибыль;

оптимальными являются параметры технологии, при которых достигается максимальная дополнительная прибыль.

Предлагаемый способ укрепления массива имеет следующие недостатки.

Если при заданных физико-механических характеристиках κ , ρ и γ откос высотой H_{np} сохраняет устойчивое состояние с коэффициентом запаса устойчивости n_{pp} при угле откоса α_{np} , то, увеличив угол наклона борта карьера, естественно предположить, что уменьшится устойчивая высота откоса, т.е. поверхность скольжения с коэффициентом запаса устойчивости n_{pp} выйдет в откос при высоте $H < H_{np}$. Это условие нарушается: выкручивая угол наклона борта карьера за предел его естественной устойчивости, предполагается, что все поверхности скольжения проходят через нижнюю бровку борта карьера.

Укрепление массива смолоинъекцией путем создания вдоль борта карьера пояса из упрочненных пород потребует бурения глубоких скважин с земной поверхности и в откос борта на всех горизонтах карьера. Глубина таких скважин, учитывая, что упрочненная зона будет находиться глубоко в массиве, а радиус распространения смол при давлении 25 МПа – 5 метров, будет значительной и составит десятки метров. Этот фактор не был учтен как дополнительные затраты при оценке экономической эффективности от выкручивания углов наклона борта карьера.

Шпаков П.С.

Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264 г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская, д. 23
spsp01@rambler.ru

Юнаков Ю.Л.

Сибирский Федеральный университет. Институт цветных металлов
660025, г. Красноярск, пр. Вузовский, 3, ауд. 415 у.к.
JJunakov@sfu-kras.ru

Исследование влияние погрешности определения прочностных характеристик (ρ и k) на предельную высота откоса

Исследовано влияние погрешности определения прочностных характеристик на определение **предельной высоты откоса** (высота (H)).

Для исследования взяты следующие данные:

- борт карьера Кия-Шалтырского нефелинового рудника высотой $H=314.1$ м;
- угол наклона борта карьера $\alpha = 45,5^\circ$; коэффициент сцепления $k = 31,2$ т/м²;
- угол внутреннего трения $\rho = 30^\circ$. Это средние показатели по руднику.

Принимая погрешность определения коэффициента сцепления и угла внутреннего трения $\pm 10\%$ от средних вначале строится матрица значений. Которая рассчитывается по специальной программе [1]. В матрицу вводим значения предельной высоты, при условии, что $\alpha = 45,5^\circ$; $\gamma = 3,0$ т/м³. Значения ρ меняется от 26° до 34° , то есть в пределах 10% от среднего, равного 30° , через 1° , а коэффициент сцепления изменяется от 28 т/м² до 35 т/м², то есть в пределах $\pm 10\%$ от среднего $31,2$ т/м².

Результаты расчетов матрицы не представлены, но по ней для полученных предельных значений высоты (H) построены изолинии (изовысоты H , рис.1 и объемные модели этой матрицы рис.2.

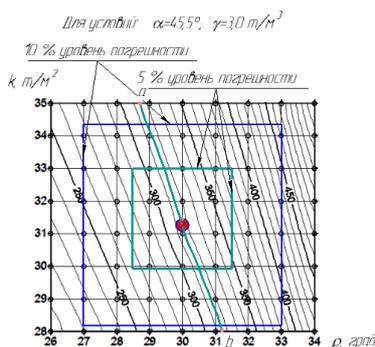


Рис.1. Изогипсы предельной высоты откоса

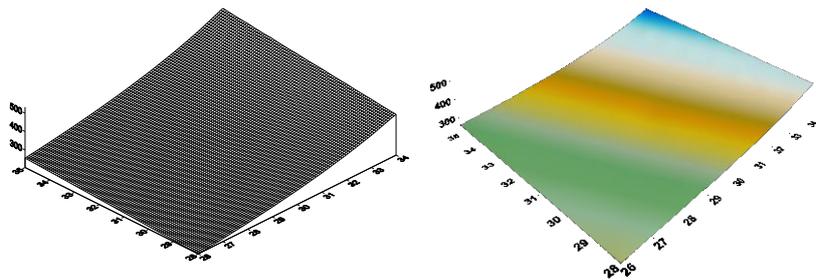


Рис.2. Зависимость высоты откоса борта карьера от угла внутреннего трения и коэффициента сцепления

В расчетной матрице на изолиниях нанесены прямоугольники с размерами 5% и 10% погрешностей (k и ρ) (рис. 1).

Анализ полученных построений позволяет сделать следующие выводы:

Рассмотрим случай когда делается максимальная ошибка в определении ρ и k .

По матрице 1 (рис.1) для погрешности 10% .

Минимальное значение $H=220$ м, максимальное значение $H= 462$ м.

По матрице 1 (рис.1) для погрешности 5%.

Минимальное значение $H=265$ м, максимальное значение $H= 380$ м.

Т.е. получаем,

Для погрешностей 10% $H = 314 \frac{+147,9}{-94,1}$, м. Для погрешностей 5% $H = 314 \frac{+49,1}{-65,9}$, м.

Любое сочетание прочностных характеристик k и ρ попадающих на плоскость матрицы левее изовысоты $ab=314,1$ м приводит к уменьшению проектной высоты борта карьера, т. е. требуется корректировка борта в сторону снижения высоты или уменьшения угла наклона борта карьера..

Любое сочетание прочностных характеристик k и ρ попадающих на плоскость матрицы правее изовысоты $ab=314,1$ м приводит к увеличению проектной высоты борта карьера, т. е. требуется корректировка борта. В этом случае может быть три варианта: увеличение высоты борта при неизменном угле наклона; увеличение угла наклона борта карьера при неизменной высоте борта карьера; все оставить без изменения с целью увеличения кзу. борта карьера.

Рассмотрим случаи, когда погрешность допущена только в одном показателе, при изменении другого.

Рассмотрим случай когда $k=31,2 \text{ т/м}^2 = \text{const}$, а ρ изменяется в пределах $\pm 10\%$.

По матрице 1 (рис.1) для погрешности 10%. Минимальное значение $H=245$ м, максимальное значение $H= 420$ м. По матрице 1 (рис.1) для погрешности 5%.

Минимальное значение $H=275$ м, максимальное значение $H= 360$ м.

Т.е. получаем, Для погрешностей 10% $H = 314 \frac{+105,9}{-69,1}$, м. Для погрешностей 5% $H = 314 \frac{+45,9}{-39,1}$, м. Рассмотрим случай когда $\rho = 30^\circ = \text{const}$, а k изменяется в пределах $\pm 10\%$.

По матрице 1 (рис.1) для погрешности 10%. Минимальное значение $H=282$ м, максимальное значение $H= 345$ м. По матрице 1 (рис.1) для погрешности 5%.

Минимальное значение $H=300$ м, максимальное значение $H= 330$ м.

Т.е. получаем. Для погрешностей 10% $H = 314 \frac{+30,9}{-32,1}$, м. Для погрешностей 5% $H = 314 \frac{+15,9}{-14,1}$, м.

Рассмотрим только отрицательное влияние в разнице изменения приращения высоты из-за погрешности ρ и k (в %). Для погрешностей в 10% $q = - 69,1/- 32,1=2,15$.

Для погрешностей в 5% $q = - 39,1/- 14,1= 2,77$.

Т.е. изменение прироста проектной высоты из-за ошибки в определении сцепления больше чем в 2 раза по сравнению с такой же ошибкой определения угла внутреннего трения.

Затраты на проведение исследований по определению прочностных характеристик значительны, но они намного меньше чем корректировка борта карьера и последствия этого изменения.

Необходимо отметить, что аналогичные исследования можно провести для любых строк или любых столбцов матрицы. Нет никаких трудностей спроектировать другую матрицу для любых исходных данных.

Вывод. Параметры коэффициента сцепления необходимо определять значительно точнее и надежнее чем угла внутреннего трения.

При проектировании и расчёте устойчивости бортов карьеров необходимо пользоваться программами позволяющие вести расчет с погрешностью не грубее 0,001.

Изменение прироста (увеличение, уменьшение) проектной высоты из-за ошибки в определении сцепления для погрешностей в 10% составляет в $q = 2,15$ раза, а для погрешностей в 5% составляет в $q = 2,77$ раза по сравнению с такой же ошибкой определения угла внутреннего трения (в %, рассматривается только отрицательно влияющая сторона). Значит параметры коэффициента сцепления необходимо определять значительно точнее и надежнее чем угла внутреннего трения.

Затраты на проведение исследований по определению прочностных характеристик значительны, но они намного меньше чем корректировка борта карьера и последствия этого изменения.

Литература

1. Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л., Шпакова М.В., Фролов И.А. Программа для расчета устойчивости карьерных откосов "Stability analysis". «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». ПРОГРАММЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В РЕЕСТРЕ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. RU ОБПБТ № 4(75) 20.12.2010 Программы для ЭВМ. Рег. номер 2010614557 (09.07.2010). с.70.

Яшков В.А.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д. 23
Zirjd@mail.ru*

Информационно-графовая модель способа шлифования нецилиндрических отверстий

Для финишной обработки внутренней эллипсоидной формы рабочей поверхности корпуса применяются кинематически сложные приспособления с использованием традиционных шлифовальных кругов или лепестковые абразивные круги. Использование приведенных выше технологических решений ограничивает, а некоторых случаях делает невозможным подачу смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в зону обработки, что приводит к необходимости снижать режимы обработки для предотвращения прижогов и задиров обрабатываемой поверхности [4].

Для повышения производительности внутреннего шлифования не цилиндрических внутренних поверхностей в частности корпуса шибера насоса предлагается применить способ внутреннего шлифования сборным абразивным инструментом с радиально подвижными абразивными сегментами [1].

Методика исследования Методика состояла в исследовании кинематики движения шлифовального блока по обрабатываемой поверхности. Для изучения движения была построена информационно - графовая модель работы блока, представленная на рисунке 4.

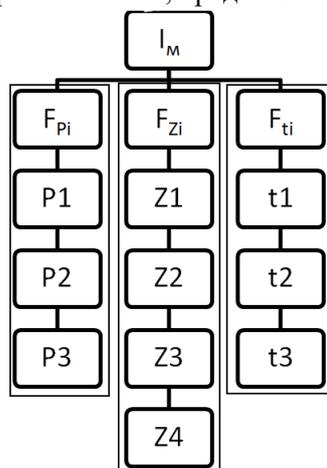


Рис. 1 Информационный граф работы абразивного блока при шлифовании нецилиндрических поверхностей.

Информационно - графовая модель I_m рисунок 1 состоит из трех ребер:

Ребро F_{Pi} - определяет прочность крепления абразивного элемента в корпусе блока;

Ребро F_{Zi} - определяет ситуация работы абразивного блока;

Ребро F_{ti} - определяет вид шлифования (черновое, получистовое, чистовое).

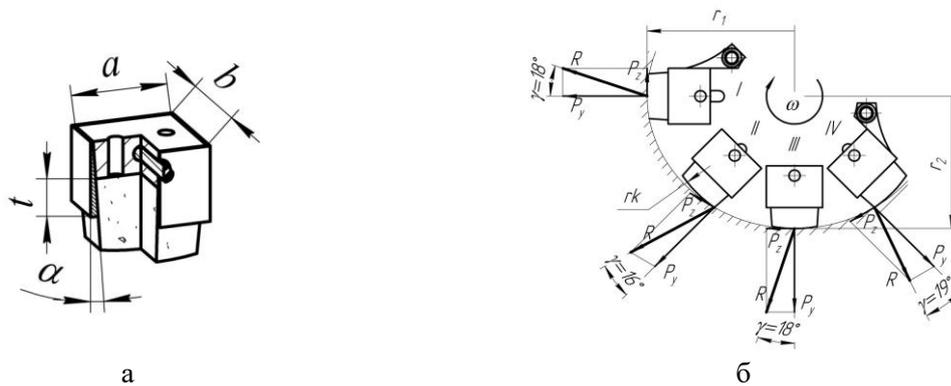


Рис. 2 Компоненты информационно-графовой модели: а - определяющие прочность крепления абразивного элемента в корпусе блока; б - определяющие условия работы абразивного блока без заклинивания.

Ребро F_{Pi} рисунок 2а представляет собой информационный массив $F_{Pi} = U_{i=1}^k P_i$, где k число компонентов P определяющих прочность крепления абразивного элемента в корпусе блока рисунок 5. Вершина P_1 - площадь сечения абразивного элемента $P_1 = f(a, b)$, вершина P_2 - глубина установки абразивного элемента в блоке $P_2 = f(t)$, вершина P_3 - угол стенок блока $P_3 = f(\alpha)$.

Ребро F_{Zi} рисунок 2б представляет собой информационный массив $F_{Zi} = U_{i=1}^k Z_i$, где k число компонентов Z определяющих условия работы абразивного блока без заклинивания рисунок 6. Вершина Z_1 - радиус правки абразивного элемента $Z_1 = f(rk)$, вершина Z_2 - угол давления (зависящий от сил резания P_z и P_y) $Z_2 = f(P_z, P_y)$, Z_3 - радиусы профиля шлифуемой поверхности $Z_3 = f(r_1, r_2)$, Z_4 - коэффициент трения между поверхностями абразивного блока и корпуса круга $Z_4 = f_{tr}$.

Ребро F_{ti} - представляет собой информационный массив $F_{ti} = U_{i=1}^k t_i$, где k число компонентов t определяющих вид шлифования (черновое, получистовое, чистовое). Вершина t_1 - масса абразивного элемента $t_1 = f(m)$, вершина t_2 - частота вращения круга $t_2 = f(\omega)$, t_3 - величина продольной подачи $t_3 = f(s)$,

В итоге информационно - графовая модель работы абразивного блока определяется следующим объединением:

$$I_m = F_{Pi} \cup F_{Zi} \cup F_{ti} = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \cup Z_1 \cup Z_2 \cup Z_3 \cup Z_4 \cup t_1 \cup t_2 \cup t_3.$$

Вывод: Построенная информационно - графовая модель позволяет наглядно определить параметры абразивного блока для обработки не цилиндрических отверстий без применения кинематически сложных приспособлений или станков с ЧПУ. Высокая скорость обработки достигается за счет подачи СОТС непосредственно в зону резания через корпус сборного абразивного инструмента. Подача СОТС непосредственно в зону резания обеспечивает охлаждение обрабатываемой поверхности, и предотвращает образование прижогов и задиrow. Конструкция подвижного блока сборного инструмента позволяет расходовать до 80% абразивного материала, что также вносит вклад в снижение себестоимости изготовления таких геометрически сложных поверхностей как у корпуса пластинчатого насоса [5].

Литература

1. А.С РФ No 2182531. МПК В24В1/00 Способ внутреннего шлифования / Д.Р. Блурцян. – Б.И., 2000.
2. Проектирование режущего инструмента. Гречишников В.А, Коротков И.А., Схиртладзе А.Г., Горохов В.А. Учебное пособие.- Москва, Сатурн-С 2003 г.

3. Яшков В.А., Гречишников В.А., Албагачиев А.Ю., Исаев А.В., Пивкин П.М., Романов В.Б. Модернизация сборного абразивного круга с радиально-подвижными сегментами для внутреннего шлифования полых деталей роботов // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2015. № 4 (35). С. 8-14.
4. Лашнев С. И. Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975. – 39 с.
5. Абразивные инструменты для обработки отверстий в деталях робототехнических комплексов Гречишников В.А., Яшков В.А., Пивкин П.М., Романов В.Б., Исаев А.В., Маслов А.Р. СТИН. 2016. № 9. С. 11-14.