

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШТОКОВ ГИДРОСТОЕК КРЕПЕЙ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

Нго Ву Нгуэн¹, Нго Ван Туан², Нгуен Тхэ Винь¹, Нгуен Суан Хынг¹

¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва;*

²*Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона, Вьетнам, Ханой*

Ключевые слова: износ, восстановление, газотермические покрытия, прочность сцепления, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, контактные напряжения, напряжения сдвига.

Аннотация. Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния контактирующих поверхностей штока и грундбоксы гидростойки секции механизированной крепи, которые позволили оценить возможность применения для ремонта штоков газотермических покрытий. Выявленные с помощью компьютерной программы *Ansys* в поверхностном слое штока напряжения сдвига и анализ их распределения по глубине детали показал, что численные значения касательных напряжений постепенно уменьшаются с 82 до 20 МПа, а на расстоянии 0,3-0,5 мм от поверхности находятся в диапазоне от 60 до 40 МПа. Это дало возможность установить наиболее приемлемый и рациональный способ восстановления штоков с учетом горно-технических условий их эксплуатации. Показано, что наиболее эффективным методом реновации штоков является высокоскоростное газопламенное напыление износостойких покрытий на основе твердых сплавов системы WC-Co,Cr, что представляет собой лучшую альтернативу процессу хромирования, применяемого для упрочнения рабочих поверхностей штоков на этапе их изготовления. Прочность сцепления с основой покрытий толщиной 0,3-0,35 мм, сформированных высокоскоростным газопламенным напылением, находится в пределах 80-100 МПа, что обеспечивает должный коэффициент запаса по прочности сцепления $K=1,45...1,5$.

SUBSTANTIATION OF THE RODS RESTORING OPERABILITY METHOD OF THE HYDRAULIC SUPPORTS OF THE TREATMENT FACES

Ngo Vu Nguyen¹, Ngo Van Tuan², Nguyen The Vinh¹, Nguyen Xuan Hung¹

¹*National Research Technological University "MISIS", Moscow;*

²*Vietnam State Technical University named after Le Qui Don, Vietnam, Hanoi*

Keywords: wear, restoration, gas-thermal coatings, coating adhesion strength, computer modeling, stress-strain state, finite element method, contact stresses, shear stresses.

Abstract. The results of the study of the stress-strain state of the contacting surfaces of the rod and the groundbooks of the hydraulic resistance section of the mechanized support are presented, which made it possible to evaluate the possibility of using gas-thermal coatings for the repair of rods. The shear stresses detected by the *Ansys* computer program in the surface layer of the rod and the analysis of their distribution over the depth of the part showed that the numerical values of tangential stresses gradually decrease from 82 to 20 MPa, and at a distance of 0.3-0.5 mm from the surface are in the range from 60 to 40 MPa. This made it possible to establish the most acceptable and rational way to restore the rods, taking into account the mining and technical conditions of their operation. It is proved that the most effective method of rod renovation is high-speed flame spraying of wear-resistant coatings based on hard alloys of the WC-Co-Cr system, which is the best alternative to the chrome plating process used to harden the working surfaces of rods at the stage of their manufacture. The adhesion strength of 0.3-0.35 mm thick coatings formed by high-speed flame spraying is in the range of 80-100 MPa, which provides a proper coefficient of adhesion strength margin $K = 1.45...1.5$.

Введение

Технологии, реализуемые в современном ремонтном производстве для восстановления работоспособности деталей, достаточно разнообразны. Как правило, они основаны на использовании различных методов формирования функциональных покрытий, таких как наплавка, газотермическое и холодное газодинамическое напыление, электроискровое упрочнение, гальваническое осаждение и др. [1, 2]. При этом для оценки возможности

применения того или иного метода в каждом конкретном случае руководствуются величиной и характером рабочих нагрузок, воспринимаемых деталью, видом и степенью ее повреждения, а также требованиями, предъявляемыми к эксплуатационным характеристикам восстанавливаемой поверхности. Последние, как известно, определяются конструктивными особенностями, материалом восстанавливаемой детали, физико-механическими свойствами и качеством ее поверхностного слоя.

Немаловажным фактором при выборе способа восстановления является его универсальность, экологическая безопасность, простота в обслуживании и мобильность используемого оборудования, стабильность и воспроизводимость качества восстановительных работ, возможность автоматизации процесса восстановления.

Шток гидростойки механизированной крепи является выходным звеном силового гидроцилиндра [3]. Он функционирует в условиях воздействия значительных внешних асимметрично приложенных циклических нагрузок и обеспечивает должную несущую способность крепи очистного забоя, и, следовательно, безопасность ведения очистных работ.

Согласно статистике, порядка 40-50% отказов силовых гидроцилиндров происходят по причине износа и коррозии рабочей поверхности штоков, контактирующей с уплотнением грундбуксы [4, 5]. К числу факторов, усугубляющих условия эксплуатации штоков, можно отнести: наличие абразивной пыли, перепады температур, высокую влажность окружающего воздуха и др. Известно, что около 60...70% штоков теряют свою работоспособность, не выработывая предусмотренный ресурс. Это приводит к необходимости изыскания эффективного универсального метода восстановления его эксплуатационных характеристик, а также организации специализированных участков по ремонту штоков, принимая во внимание их большое количество и значительную номенклатуру.

Краткий обзор методов упрочнения и восстановления штоков, применяемых материалов

Анализирую технологию изготовления штоков, можно выделить четыре основных этапа, на которых обеспечиваются требуемые качество и эксплуатационные свойства рабочей поверхности детали:

- 1) формообразующая механическая обработка;
- 2) упрочняющая объемная термическая обработка;
- 3) упрочняющая поверхностная обработка ТВЧ и гальваническим хромированием;
- 4) отделка рабочей поверхности полированием.

Поверхностной закалкой ТВЧ с последующим гальваническим хромированием обеспечиваются положительный градиент физико-механических свойств материала детали от сердцевины к поверхности на глубине 1,5...3,0 мм под хромовое покрытие и, тем самым, достигается высокая износостойкость поверхностного слоя и сопротивляемость коррозии. Но, несмотря на наличие упрочняющего хромирования, в процессе эксплуатации рабочая поверхность штоков подвергается интенсивному неравномерному износу. При этом основными поверхностными дефектами являются следы коррозии и абразивного изнашивания в виде царапин и рисок [4, 5], глубина которых часто превышает толщину хромового покрытия. Это приводит к необходимости поиска методов восстановления, обеспечивающих возможность компенсации размеров и форм изношенных поверхностей наряду с достижением требуемого уровня эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей штока.

Большие перспективы в области восстановления изношенных штоков открывают методы газотермического напыления (ГТН), в частности, методы плазменного и высокоскоростного газопламенного напыления [6]. В ряде случаев производители гидравлического оборудования взамен хромирования штоков стали использовать технологию ГТН, благодаря экологической безопасности процесса.

Вместе с тем, несмотря на бесспорные достоинства, ГТН имеет и недостатки, одним из которых является ограниченная прочность сцепления покрытия с основным материалом

детали. Так, например, прочность сцепления для плазменных покрытий, сформированных в неконтролируемой атмосфере, ограничивается 45-55 МПа. Для покрытий, напыляемых высокоскоростным газопламенным методом (*HVOF*- и *HVAF*- процессы), прочность сцепления выше и достигает 80-100 МПа, благодаря высоким энергетическим параметрам процесса. Так, скорость полета частиц при высокоскоростном напылении достигает 700-800 м/с, что позволяет формировать высокоплотные покрытия с механическими характеристиками, соответствующими идентичным компактным материалам. Еще одно достоинство метода – отсутствие интенсивного нагрева восстанавливаемой поверхности и, соответственно, коробления детали, а также сохранение исходной структуры материала подложки. Температура нагрева основы не превышает 150°C, что значительно ниже температуры протекания фазовых превращений в стали. При этом в связи с малой шероховатостью поверхности создаваемого покрытия механическая обработка после его нанесения имеет небольшой объем. Для этих целей, как правило, используют абразивную либо алмазно-абразивную обработку. Одно из преимуществ высокоскоростного напыления по сравнению с наплавкой состоит в возможности многократного восстановления одной и той же поверхности, что выгодно отличает этот метод от наплавки [7, 8]. Благодаря компактности и мобильности современных установок, этот метод можно реализовать также и в полевых условиях с возможностью нанесения широкого спектра материалов покрытий – от коррозионностойких металлических сплавов до металллокерамических материалов [6].

Для восстановления и упрочнения штоков обычно рекомендуют покрытия на основе твердых сплавов WC-Co, WC-Co-Cr, или Cr₃C₂ 75%+NiCr20 25%, обладающие более высокими механическими и трибологическими характеристиками в сравнении с хромовым покрытием [8].

При напылении на шток гидроцилиндров спецтехники твердосплавных материалов системы WC-Co-Cr прочность сцепления покрытия со стальной основой превышает 80 МПа, а его микротвердость превосходит микротвердость гальванического хрома. При стоимости напыления менее 10% от стоимости готового изделия ресурс деталей увеличивается на 20-30%, ресурс штоков на 50% [6].

В твердосплавных покрытиях системы WC-Co-Cr доля металлической матрицы, как правило, находится в пределах 20-30% [9], что обеспечивает достаточно высокую адгезию и когезию покрытий за счет интенсивной деформации металлических частиц напыляемого порошка, при их соударении с поверхностью подложки и промежуточными слоями покрытия [10]. Присутствие кобальта – как основного связующего в металлической матрице твердого сплава, обеспечивает высокую смачиваемость карбида вольфрама [11], и, соответственно, должную адгезию и когезию покрытия, что формирует высокие эксплуатационные характеристики поверхностного слоя [12].

Прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{сц}$ для бикомпонентных деталей является важнейшим эксплуатационным показателем и представляет собой критическое напряжение, возникающее на границе раздела покрытия с основой в момент действия внешней нагрузки, стремящейся оторвать покрытие от основы в нормальном или тангенциальном направлениях. Количественную оценку прочности сцепления выполняют с помощью различных экспериментальных методов. Аналитические методы расчета дают весьма приближенные результаты.

Методы исследования

Шток гидростойки работает в достаточно сложном нагруженном состоянии в условиях трения скольжения, испытывая значительные контактные нагрузки при его перекосах вследствие наличия зазоров в соединениях и действия асимметричной внешней силы. Отслоение покрытия может привести к преждевременному выходу из строя гидростойки и даже секции механизированной крепи. Поэтому для обоснования возможности применения данной технологии для штоков гидростоек необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние контактных поверхностей штоков, возникающих под действием

эксцентрично приложенной внешней нагрузки. От работоспособности штока зависит несущая способность крепи, поэтому целесообразность и безопасность применения износостойких газотермических покрытий должна быть подтверждена данными по напряжениям на контактных площадках и в поверхностном слое, величина которых не должна превышать величину прочности сцепления покрытия с основой.

Применение стандартных методик расчета гидростоек на контактную и статическую прочность позволяют выявить наиболее нагруженные участки элементов гидростоек. Однако эти расчеты не дают представления о распределении напряжений по глубине штока и грундбоксы, что имеет существенное значение для деталей с газотермическими покрытиями. В связи с этим, для достоверной оценки контактных напряжений на рабочей поверхности штока и в поверхностном слое с учетом конструктивных зазоров в соединениях воспользуемся методами компьютерного моделирования

Поставленную задачу по оценке уровня напряжений на контактной поверхности и в поверхностном слое штока решим при помощи метода конечных элементов, широко применяемого в последние десятилетия для выполнения инженерных расчетов. С этой целью на первом этапе при помощи программного обеспечения *Inventor* была создана твердотельная цифровая модель гидростойки одинарной раздвижности со сферическими опорами (рис. 1) и сформирована конечно-элементная сетка. Далее при помощи программного обеспечения *Ansys* были смоделированы условия взаимодействия деталей соединений при нагружении их внешней эксцентрично приложенной к штоку нагрузкой.

При этом оценка напряжений выполнялась с учетом имеющихся в соединениях конструктивных зазоров и моделированием наиболее неблагоприятных условий контакта, отвечающим наибольшим позиционным отклонениям штока, а также максимально возможным деформациям и контактными напряжениями. При создании твердотельной модели соблюдались требования точности расположения цилиндрических поверхностей. Принятые обозначения геометрических параметров гидроцилиндра и зазоров в соединениях приведены на рисунке 2.

Физико-механические характеристики материалов элементов гидроцилиндра, в частности, пределы прочности σ_b и текучести σ_T , принимались с учетом применяемой для каждого материала термообработки:

- цилиндр – сталь 30ХГСА (улучшение);
- поршень – сталь 40Х (улучшение),
- опорный пояс – латунь Л 82;
- грундбукса – сталь 40Х (улучшение),
- шток – сталь 40Х (улучшение, закалка ТВЧ, хромирование).

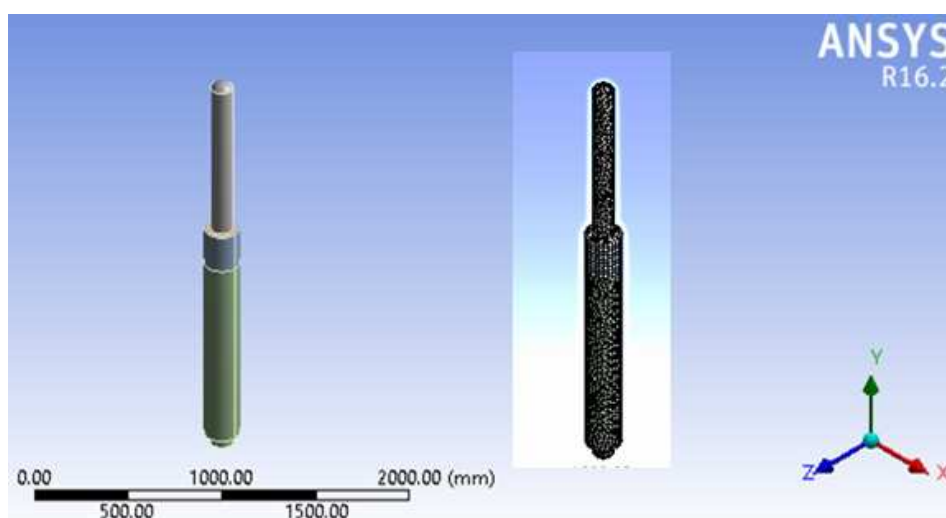


Рис. 1. Твердотельная модель гидроцилиндра с конечно-элементной сеткой

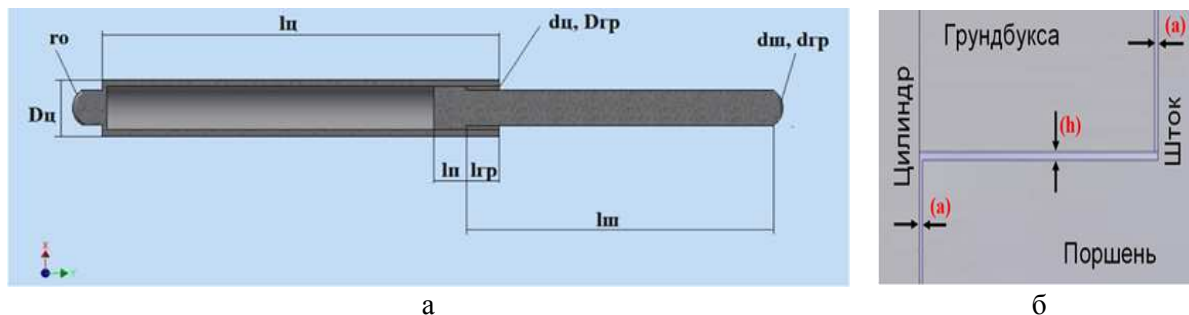


Рис. 2. Принятые обозначения геометрических параметров деталей гидроцилиндра (а) и зазоров (б): D_u, d_u, L_u – наружный и внутренний диаметры, длина цилиндра, мм; r_o – радиус сферической опоры, мм; d_n, l_n – диаметр и длина поршня, мм; d_u, l_u – рабочий диаметр и длина штока, мм; D_{gp}, d_{gp}, l_{gp} – наружный и внутренний диаметры, длина грундбуксы, мм; a – зазоры между цилиндром и поршнем, грундбуксой и штоком, мкм; h – осевой зазор между грунддуксой и поршнем

При моделировании были приняты следующие исходные данные: расчетное сопротивление гидроцилиндра P (сила), равное 820 кН, эксцентриситет приложения нагрузки на сферических опорах $e_o = 11,91$ мм, давление рабочей жидкости $Q = 40$ МПа (рис. 3). Наложено ограничение на перемещение нижней опоры, верхняя – без ограничений.

Моделирование НДС штока проводилось при точности соединений и величинах конструктивных зазоров:

– цилиндр-поршень: $\phi 160 \frac{H9}{f7}$: $ES = 100$ мкм; $EI = 0$; $es = -43$ мкм; $ei = -83$ мкм \rightarrow

$S_{\min} = 43$ мкм; $S_{\max} = 183$ мкм;

– шток-грундбукса: $H9/f7$: $\phi 120 \frac{H9}{f7}$: $ES = 87$ мкм; $EI = 0$; $es = -36$ мкм; $ei = -71$ мкм \rightarrow

$S_{\min} = 36$ мкм; $S_{\max} = 158$ мкм. При этом зазоры в соединениях изменялись от S_{\min} до S_{\max} с шагом $\Delta S = 15$ мкм.

Таким образом, смоделировано множество различных НДС штока, дающих представление об условиях контакта и зонах с максимальными контактными напряжениями.

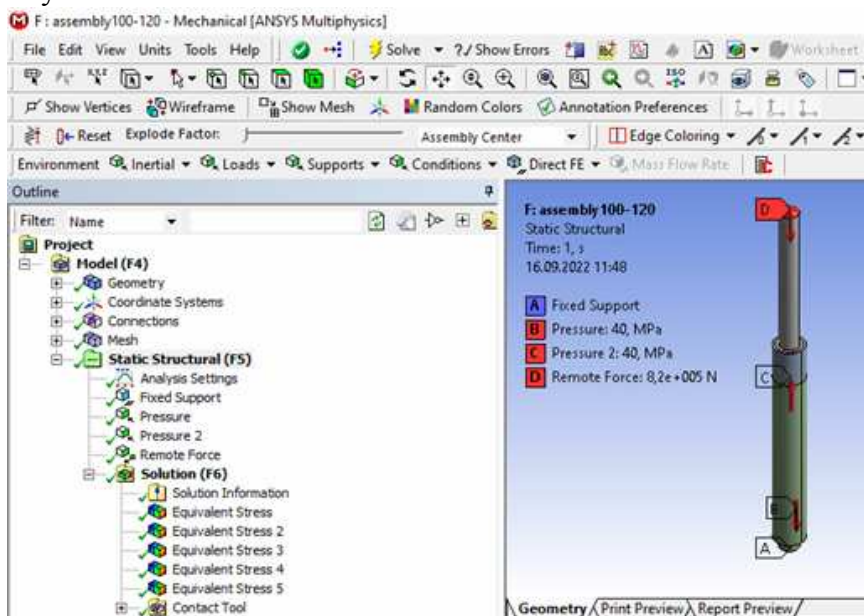


Рис. 3. Принятые нагрузки и ограничения

Результаты исследования

На рисунке 4 представлена гидростойка в деформированном состоянии под нагрузкой при максимальном перекосе штока. На рисунках 6-8 показаны напряжения соответственно на штоке и грундбуксе при самых неблагоприятных условиях контакта.

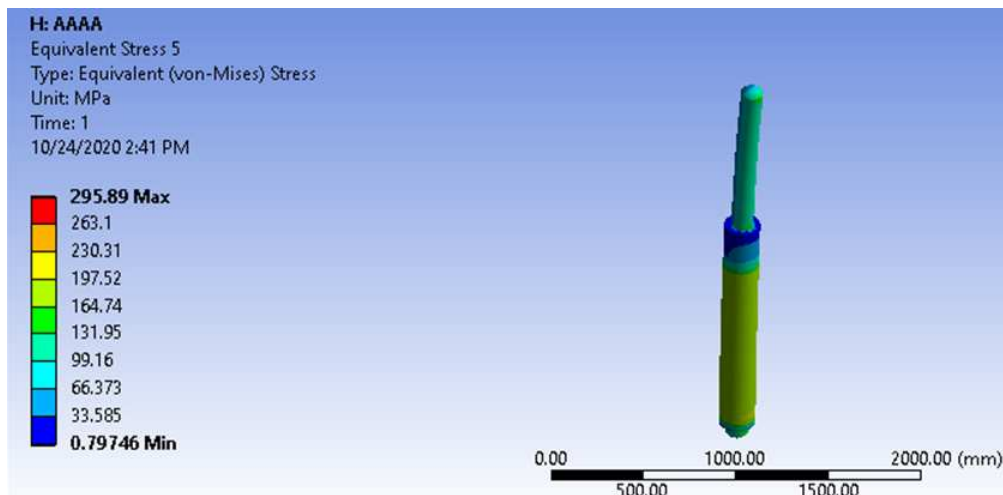


Рис. 4. Деформированное состояние гидроцилиндра при максимальном перекосе штока

В результате компьютерного моделирования были определены контактные напряжения в паре грундбукса-шток (рис. 5). Из рисунка видно, что максимальные напряжения имеют локальный характер. Уровень контактных напряжений свидетельствует о том, что для упрочнения штоков целесообразно применять покрытия на основе твердых плавов и самофлюсующихся материалов, физико-механические и эксплуатационные характеристики которых не уступают, а порой и превосходят характеристики твердого хрома, что согласуется с ранее проведенными исследованиями [9-12].

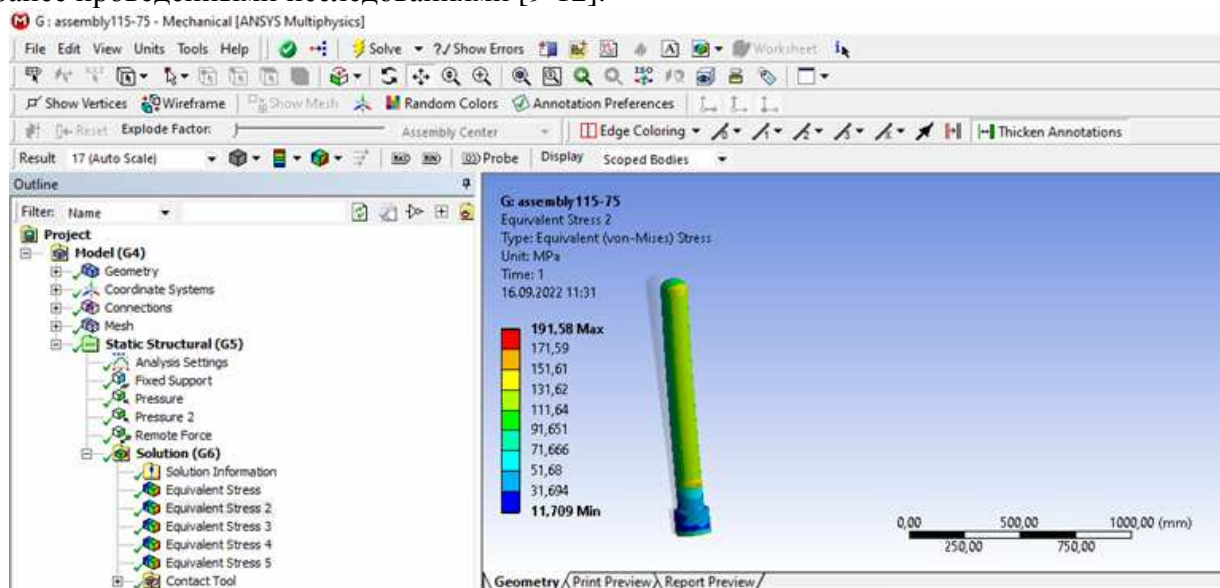


Рис. 5. Контактные напряжения на штоке с учетом его максимального перекоса

На рисунке 6 показана картина распределения контактных напряжений в грундбуксе. Локализация напряжений по контактному краю торцевой поверхности детали свидетельствует о перекосе штока, что может привести к ускоренному износу как штока, так и грундбуксы. По этой причине зазоры в соединениях должны быть близки к минимальным значениям, что в свою очередь, позволит уменьшить влияние неопределенности базирования штока на его позиционные отклонения под действием эксцентрично приложенной нагрузки.

Программные модули *Ansys* позволили рассчитать на штоке и грундбуксе и касательные напряжения сдвига (рис. 7, 8), возникающие под действием внешней нагрузки, что дает возможность оценить целесообразность применения для штока газотермических покрытий, их рациональную толщину. Из рисунка 8 видно, что максимальные значения напряжений сдвига наблюдаются на поверхности штока, однако по глубине поверхностного слоя – от поверхности к сердцевине, их значение постепенно убывает. Таким образом, зная картину

касательных напряжений на различных участках поверхностного слоя в поперечном сечении, можно прогнозировать их значение на границе раздела покрытие-основа во избежание появления условий, способствующих отслоению покрытия.

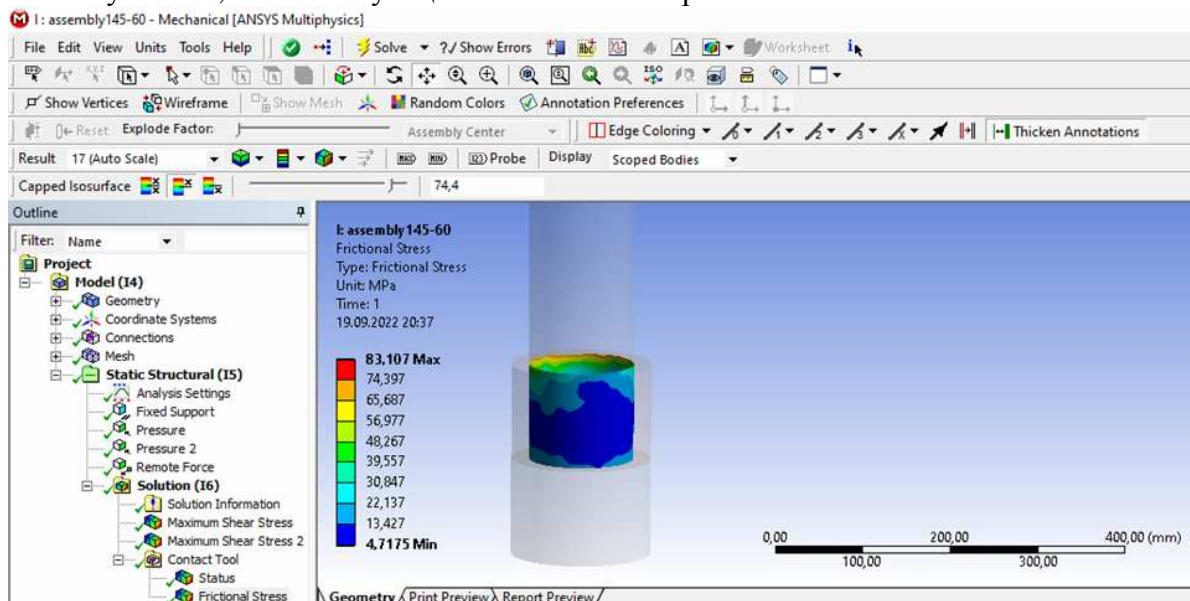


Рис. 6. Распределения контактных напряжений наgrundбусе (при зазорах между цилиндром и поршнем 145 мкм, в паре grundбуска-шток 60 мкм)

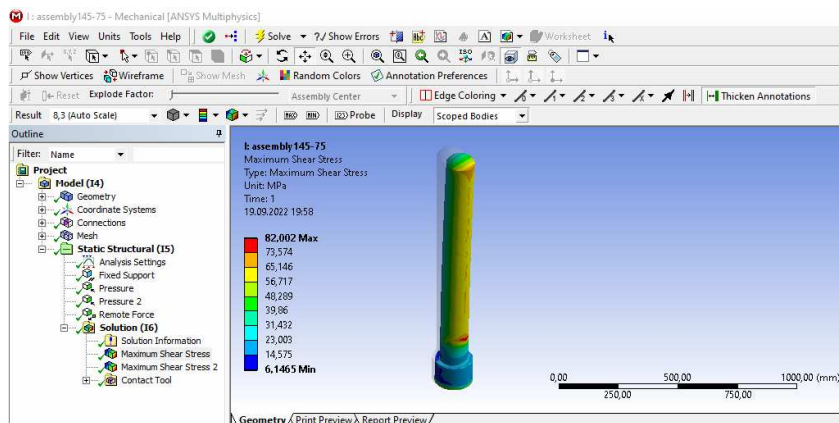


Рис. 7. Напряжения сдвига на штоке при зазорах: в паре цилиндр-поршень 75 мкм, между grundбуской и штоком – 145 мкм

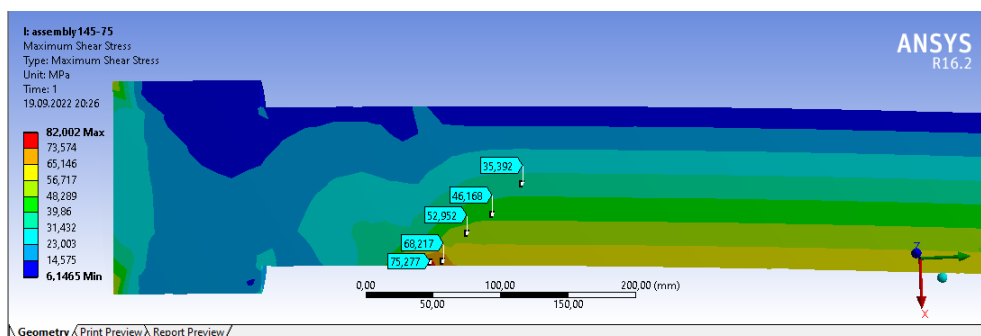


Рис. 8. Распределение напряжений сдвига по глубине штока при его максимальном перекосе

На рисунках 9, 10 показано, как изменяются напряжения сдвига по глубине штока. Так, если на поверхности они имеют значение, равное 82 МПа, то на глубине 130 мкм уровень напряжений постепенно снижается до 68 МПа. Далее, на глубинах 330 и 530 мкм они убывают до 40 МПа. Учитывая, что толщина покрытий, напыляемых на шток при их восстановлении, редко превышает 300 мкм, можно предположить, что на границе раздела

покрытия с основой при самых неблагоприятных условиях контакта напряжения будут в диапазоне 40-60 МПа. Принимая во внимание уровень прочности сцепления покрытия с подложкой, формируемый при высокоскоростном напылении в пределах 80...100 МПа, коэффициент запаса по прочности сцепления покрытия составит $K=1,45...1,5$, что обеспечивает должные эксплуатационные свойства и надежность штоков с твердосплавным покрытиями.

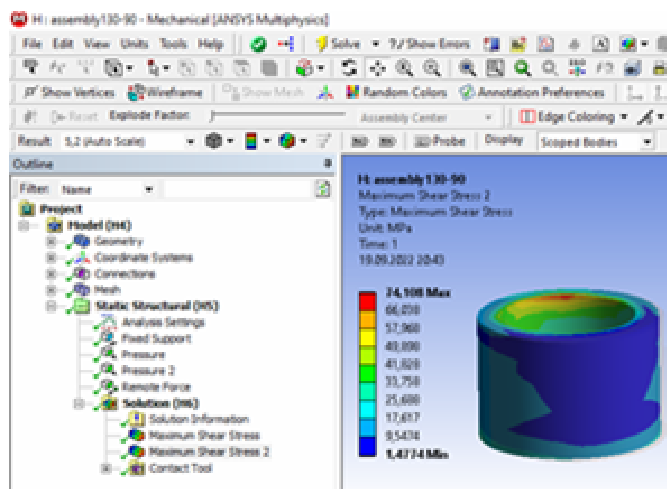


Рис. 9. Напряжения сдвига в грундбуксе при зазорах: в паре цилиндр-поршень 90 мкм, между грундбуксой и штоком 130 мкм

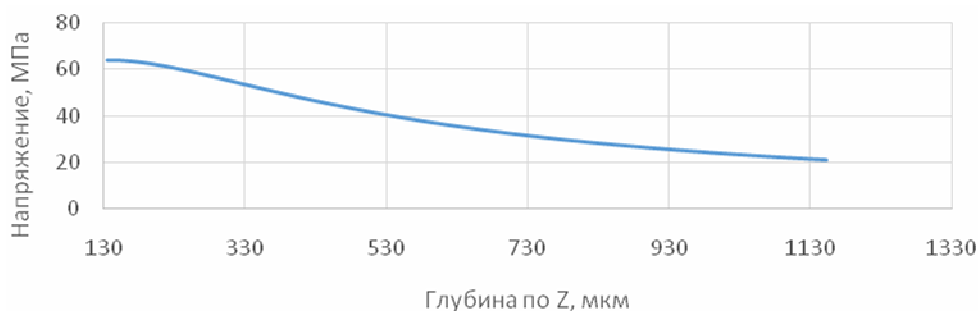


Рис. 10. Распределение напряжений сдвига по глубине штока

Заключение

Из анализа результатов численного эксперимента по моделированию НДС элементов соединения грундбукса-шток вытекает следующий вывод – максимальное касательное напряжение (напряжение сдвига) на поверхности штока при наибольших его перекосах под действием внешней силы достигает 82 МПа. Это значение постепенно уменьшается в направлении от поверхности к сердцевине детали и на глубине 530 мкм снижается до 40 МПа и далее до 20 МПа. Из этого следует, что в предполагаемой пограничной зоне газотермического покрытия и основного материала при толщине покрытия 0,3...0,35 мм величины касательных напряжений изменяются в интервале 40-60 МПа. Таким образом, наиболее приемлемым методом для восстановления штоков гидростоек является высокоскоростное газопламенное напыление твердосплавных покрытий, при котором прочность сцепления покрытия с основой превышает 80 МПа, а коэффициент запаса по прочности сцепления покрытия составляет 1,45...1,5.

Список литературы

1. Воробьев Л.Н. Технология машиностроения и ремонт машин: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1981. – 344 с.
2. Солод Г.И., Морозов В.И., Русихин В.И. Технология машиностроения и ремонт горных машин. – М.: Недра, 1988. – 421 с.
3. Коваль П.В. Гидравлика и гидропривод горных машин: Учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы». – М.: Машиностроение, 1979. – 319 с.

4. Sevagin S.V., Mnatsakanyan V.U. Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 709, p. 044095.
5. Севагин С., Вержанский А.П. Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №5. – С. 35-44.
6. Балдаев Л.Х., Балдаев С.Л., Маньковкий С.А. Повышение эксплуатационных характеристик горного оборудования путем нанесения защитных покрытий газотермическими методами // Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении», «Неделя горняка –2012». – М.: МГТУ, 2012. – С. 99-107.
7. Наплавка штоков и труб крупных и негабаритных промышленных гидроцилиндров, устранение дефектов, сколов, царапин, выбоин штока гидроцилиндра диаметром более 150 мм [Электронный ресурс]. – URL: <https://b-trans.com.ua/blog/153-naplavka-shtokov-i-trub-krupnyh-i-negabaritnyh-promyshlennyhgidrocilindrov-ustranenie-defektov-skolov-carapin-vyboin-shtoka-gidrocilindra-fbolee-150mm.html>.
8. Picas J.A., Forn A., Matthaus G. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves // Wear. 2006, vol. 261, pp. 477-484. doi: 10.1016/j.wear.2005.12.005.
9. Berger L.-M. Coatings by thermal spray / V.K. Sarin, D. Mari, L. Llanes, C. Nebel (Eds.) // Compr. Hard Mater, Elsevier, Amsterdam, NL. 2014, pp. 471-506.
10. Lay S., Missiaen J.-M. Microstructure and morphology of hardmetals / V.K. Sarin, D. Mari, L. Llanes, C. Nebel (Eds.) // Compr. Hard Mater., Elsevier. 2014, pp. 91-120.
11. Kurlov A.S., Gusev A.I. Tungsten Carbides. – Cham: Springer International Publishing, 2013.
12. Fang Z.Z., Koopman M.C., Wang H. Cemented tungsten carbide hardmetal-an intro-duction / V.K. Sarin, D. Mari, L. Llanes, C. Nebel (Eds.) // Compr. Hard Mater. Elsevier. 2014, pp. 123-137.

References

1. Vorobyov L.N. Engineering technology and machine repair: Textbook for universities. – М.: Higher School, 1981. – 344 p.
2. Malt G.I., Morozov V.I., Rusikhin V.I. Technology of mechanical engineering and repair of mining machines. – М.: Nedra, 1988. – 421 p.
3. Koval P.V. Hydraulics and hydraulic drive of mining machines: textbook for universities with a degree in Mining Machines and Complexes. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – 319 p.
4. Sevagin S.V., Mnatsakanyan V.U. Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 709, p. 044095.
5. Sevagin S., Verzhansky A.P. Ensuring the required quality of manufacturing of hydraulic cylinder rods for load-and-dump machines // Mining information and analytical bulletin. 2021, no. (5), pp. 35-44.
6. Baldaev L.Kh., Baldaev S.L., Mankovskiy S.A. Improving the operational characteristics of mining equipment by applying protective coatings using gas thermal methods // Collection of scientific papers of the seminar "Modern technologies in mining engineering", "Miner's Week -2012". – М.: MSTU, 2012. – P. 99-107.
7. Surfacing of rods and pipes of large and oversized industrial hydraulic cylinders, elimination of defects, chips, scratches, potholes of the hydraulic cylinder rod with a diameter of more than 150 mm [Electronic resource]. – URL: <https://b-trans.com.ua/blog/153-naplavka-shtokov-i-trub-krupnyh-i-negabaritnyh-promyshlennyhgidrocilindrov-ustranenie-defektov-skolov-carapin-vyboin-shtoka-gidrocilindra-fbolee-150mm.html>.
8. Picas J.A., Forn A., Matthaus G. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves // Wear. 2006, vol. 261, pp. 477-484. doi: 10.1016/j.wear.2005.12.005.
9. Berger L.-M. Coatings by thermal spray / V.K. Sarin, D. Mari, L. Llanes, C. Nebel (Eds.) // Compr. Hard Mater, Elsevier, Amsterdam, NL. 2014, pp. 471-506.
10. Lay S., Missiaen J.-M. Microstructure and morphology of hardmetals / V.K. Sarin, D. Mari, L. Llanes, C. Nebel (Eds.) // Compr. Hard Mater., Elsevier. 2014, pp. 91-120.
11. Kurlov A.S., Gusev A.I. Tungsten Carbides. – Cham: Springer International Publishing, 2013.
12. Fang Z.Z., Koopman M.C., Wang H. Cemented tungsten carbide hardmetal-an intro-duction / V.K. Sarin, D. Mari, L. Llanes, C. Nebel (Eds.) // Compr. Hard Mater. Elsevier. 2014, pp. 123-137.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Нго Ву Нгуэн – аспирант	Ngo Vu Nguyen – postgraduate student
Нго Ван Туан – кандидат технических наук, преподаватель	Ngo Van Tuan – candidate of technical sciences, university teacher
Нгуен Тхэ Винь – аспирант	Nguyen The Vinh – postgraduate student
Нгуен Суан Хынг – аспирант	Nguyen Xuan Hung – postgraduate student
artvik@bk.ru	

Получена 30.09.2022