

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОВИЛЬНЫХ МЕТЧИКОВ

Т.А. Шайкина², Ю.И. Кургузов¹, И.Е. Адеянов¹

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ЗАО «СибТрейдСервис»
443052, г. Самара, ул. Земеца, 32, корп. 208

E-mail: tms@samgtu.ru

Разработана физическая модель процесса образования резьбового соединения, обеспечивающего достаточную надежность закрепления инструмента в теле трубы и заданную грузоподъемность при проведении ремонтных работ, а также модель процесса поверхностного упрочнения резьбы микрошариками. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления ловильного инструмента.

Ключевые слова: метчик, ловильная резьба, упрочнение, микрошарики, остаточные напряжения.

Введение

При ремонте скважин извлечение оборвавшихся или отвернувшихся бурильных, насосно-компрессорных и обсадных труб производится с помощью основных ловильных инструментов, к которым относят [1] собственно ловители, колокола, труборезы, труболовки, метчики и др., обеспечивающие непосредственное соединение с аварийным объектом. Если верхний конец аварийной колонны, которая не может вращаться, оканчивается ниппелем или гладкой поверхностью, если в ходе ликвидации аварии требуется приложение больших крутящих моментов, то в этих случаях используют метчики. Инструменты с правой резьбой применяются для извлечения оставшейся колонны целиком, с левой – для отвинчивания и извлечения колонны по частям. Метчики, вводимые в трубу и врезающиеся в ее тело, называются универсальными. На их протяженной конической поверхности имеется остроугольная резьба специального профиля. Различные участки длины такой поверхности могут захватывать трубы нескольких размеров.

Метчики изготавливают из прочных и вязких сталей, например 12ХН2, 12ХНЗА. На последней операции технологического процесса изготовления метчика ловильная резьба подвергается термообработке – цементации на глубину 0,4 – 0,7 мм с последующей закалкой на низко отпускаемый мартенсит с твердостью 58 – 64 HRC. Большинство метчиков имеют центральный канал для прохода промывочной жидкости. В производственных условиях попадание метчика в отверстие бурильной колонны фиксируется скачкообразным повышением давления. Когда же метчик соединился с колонной, то нагрузка снижается, а жидкость начинает циркулировать через забой. В действительности указанные факты еще не служат достоверным свидетельством получения надежного сцепления трубы и инструмента.

Тамара Александровна Шайкина, инженер.

Юрий Иванович Кургузов (к.т.н., доц.) доцент кафедры «Технология машиностроения».

Игорь Евгеньевич Адеянов (к.т.н.), доцент кафедры «Механика».

Цель проведенного исследования состояла в определении характера разрушения резьбовой поверхности метчика в условиях эксплуатации, анализе прочности лоперильной резьбы как в процессе ввинчивания, так и в процессе подъема колонны, а также в разработке технологических мероприятий, направленных на повышение качества рабочих поверхностей инструмента. Поставленную цель решали с помощью:

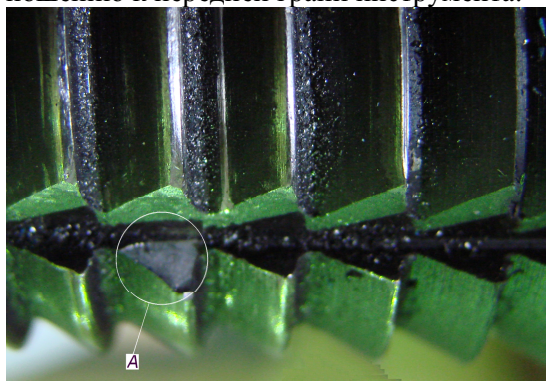
- проведения стендовых эксплуатационных испытаний метчика;
- моделирования напряженного состояния в наиболее нагруженном зубе инструмента на различных стадиях его работы;
- моделирования напряженно-деформированного состояния рабочей поверхности метчика при упрочнении микрошариками.

Характер разрушения зубьев

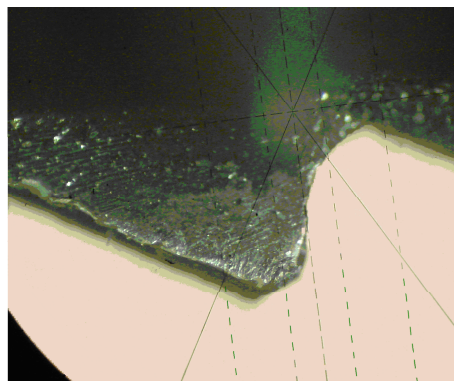
Испытания и практика эксплуатации метчиков показывают, что их зубья могут разрушаться. Так, на рис. 1 показан характерный излом на передней поверхности наиболее нагруженного зуба, полученный при стендовых испытаниях на установке 1 РС метчика, изготовленного на ЗАО «СибТрейдСервис». Испытания проводились по методике, приведенной в [1].

Метчик закрепляли в теле трубы после трех его оборотов с приложением осевой нагрузки 20 кН. Затем при неполных 0,3 – 0,5 оборотах происходило дополнительное крепление метчика с нагрузкой 30 кН. Крутящий момент, приложенный к метчику, составлял 382 Нм. В этот момент силы врезания достигали своего максимального значения. Далее к метчику прикладывалась растягивающая нагрузка 300 кН. В таком нагруженном состоянии инструмент находился в течение пяти минут.

По окончании испытания нагрузку снимали и проводили визуальный осмотр с использованием микроскопа БМИ-1Ц. Внешний вид трех резьбовых витков, вступивших в контакт с отверстием трубы и отмеченных на закаленной поверхности светлыми полосами, показан на рис. 1, а. Самая большая нагрузка приходилась на резьбовые поверхности зуба А, где отмечается скол по передней грани и затупление вершины размером $1,36 \times 0,75$ мм соответственно в продольном и радиальном направлении. Разрушение происходит от напряжений, соизмеримых с пределом прочности материала и возникающих, по нашему предположению, под воздействием сил резания при ввинчивании метчика в тело трубы. Изображение на рис. 1, б вершины зуба А получено при перпендикулярном расположении окуляра микроскопа по отношению к передней грани инструмента.



а



б (×30)

Р и с. 1. Внешний вид рабочих витков метчика после испытания

Моделирование нагрузок, действующих на зубья метчика при ввинчивании в тело трубы

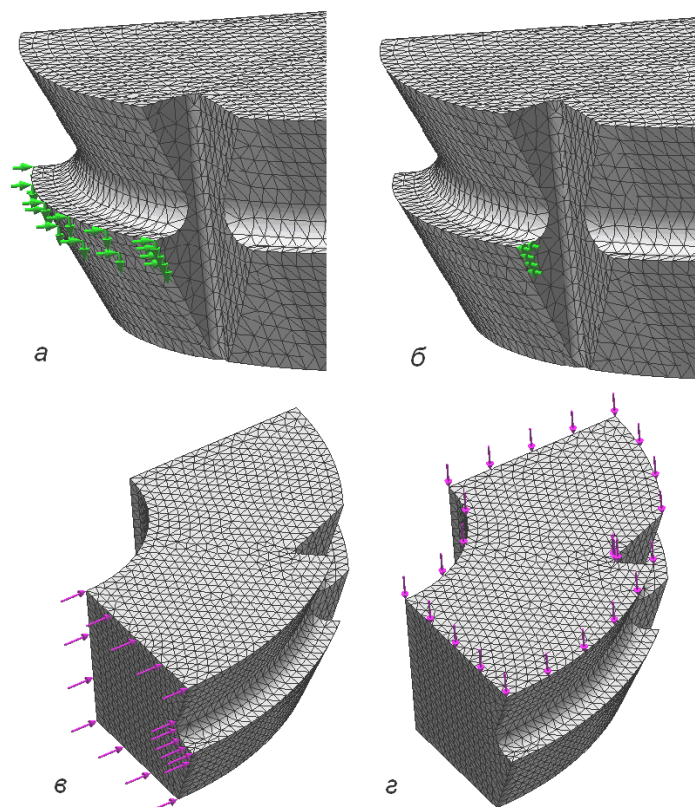
С целью выявления области распределения и величины разрушающих напряжений ниже приведен в первом приближении анализ напряженного состояния наиболее нагруженного участка резьбы при ввинчивании, выполненный с помощью метода конечных элементов (Solid Works Simulation).

На рис. 2 с разными увеличениями представлена расчетная 3D-модель в виде сектора с двумя витками остроугольной резьбы, работающей по профильной схеме, и одной продольной канавкой. В геометрической модели, согласно рекомендациям [2], выдержано условие $a_z > \rho$. Здесь $\rho = 0,015$ мм – величина скругления режущей кромки метчика; a_z – глубина резания, которая для одного зуба принята равной

$$a_z = \frac{S}{n} \cdot \frac{k_0}{2} = 0,035 \text{ мм,}$$

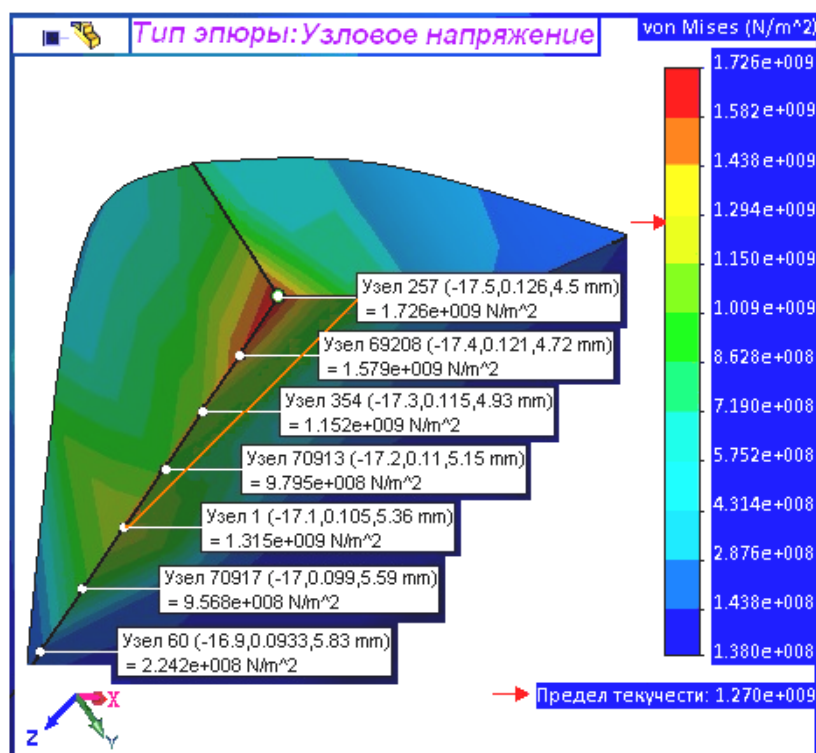
где $S = 4,5$ – шаг резьбы; $n = 4$ – число зубьев; $k_0 = 1:16$ – конусность резьбы.

Контакт резьбы метчика с телом трубы в процессе врезания моделируется заданием ограничений от перемещений (здесь и далее в виде стрелок соответствующего направления), от поворота и нагрузок – крутящего момента и осевой силы.



Р и с. 2. Задание ограничений и нагрузок:
 a – от осевого и радиального перемещения; $б$ – от поворота;
 $в$ – от крутящего момента; $г$ – от осевой силы

На рис. 3 приведены результаты исследования, которые оказались адекватными выводу, сделанному на основании стендовых испытаний. Треугольником, два угла которого расположены в узлах 1 и 257, выделена площадка, по которой на переднюю грань метчика действует тангенциальная нагрузка (см. также рис. 2, б). Показано напряженное состояние режущей кромки, возникающее под нагрузкой в различных узлах сетки с заданными координатами. Напряжения в вершине инструмента, на глубине 0,12 мм под передней гранью превысили исходный предел текучести материала $\sigma_T = 1,27 \cdot 10^9$ Па и составили $(1,58 - 1,72) \cdot 10^9$ Па.



Р и с. 3. Распределение напряжений (Па) по режущей кромке метчика

Моделирование нагрузок, действующих на зубья метчика при извлечении трубы

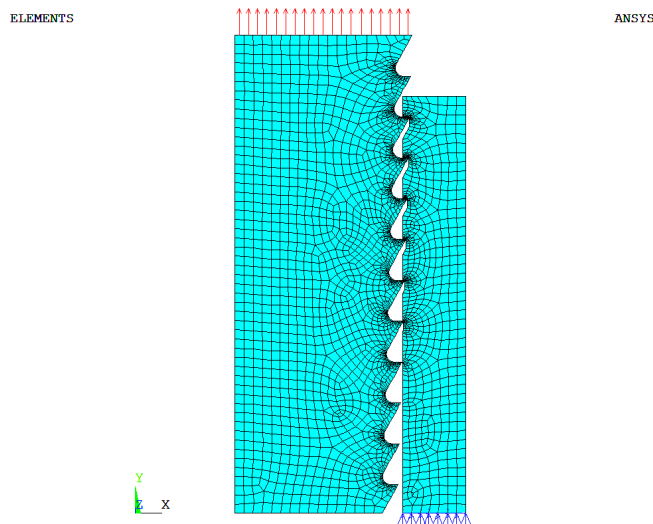
Основное требование, предъявляемое к полученному резьбовому соединению, – обеспечение прочности, достаточной не только для получения резьбы в трубе, но и для ее извлечения из скважины.

Задача моделирования в этом случае состоит в анализе процесса подъема буровой трубы без ее разрушения. Модель построена в предположении, что вес буровых труб не превышает номинальной грузоподъемности метчика, равной 300 кН, что его закрепление происходит при $N = 3$ оборотах вращения ротора и при максимальной глубине врезания

$$t = a_z \cdot n \cdot N.$$

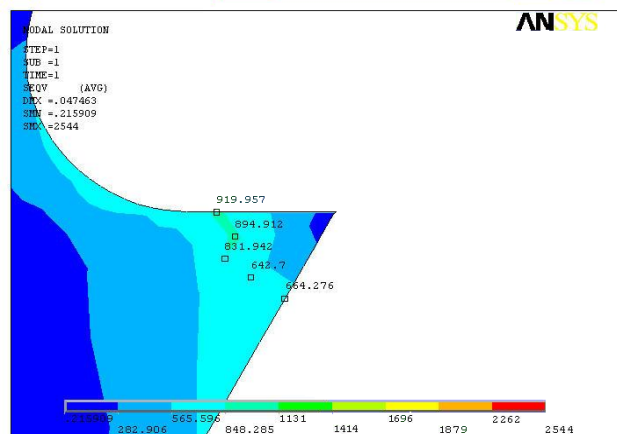
С учетом указанных выше значений глубина t составила 0,42 мм.

При моделировании предыстория нагружения, связанная с ввинчиванием метчика, не учитывалась. Расчетная модель, построенная в программе ANSYS, является осесимметричной и представляет собой контактную пару метчик – труба с коэффициентом трения $\mu = 0,15$. Труба жестко закреплена от перемещений по нижнему торцу. К верхнему торцу метчика приложена заданная осевая нагрузка в виде равномерно распределенного давления. Условное обозначение нагрузок и ограничений показано на рис. 4.



Р и с. 4. Вид конечно-элементной модели зацепления метчика и трубы с условным изображением нагрузок и ограничений

Результаты расчета (рис. 5) позволяют судить о том, что напряжения в наиболее нагруженном зубе меньше предела текучести материала метчика ($\sigma_T = 1,27 \cdot 10^9$ Па) и возникают на расстоянии 2,1 мм от вершины, в зоне действия наибольшего изгибающего момента. Максимальные эквивалентные напряжения здесь составляют от 832 до 920 МПа. На конце резьбы они незначительны.



Р и с. 5. Напряженное состояние по Мизесу (МПа) при нагрузке на метчик 300 кН

Анализ приведенных физических моделей показал, что значительное влияние на формирование разрушающих напряжений в вершине профиля ловильной резьбы оказывают силы резания в момент врезания ввинчиванием метчика в тело трубы. Следовательно, улучшение условий резания при работе метчика является основной задачей, которую необходимо решить для обеспечения надежности срабатывания инструмента. Данную задачу решали технологическими методами.

Предложения по совершенствованию технологического процесса изготовления метчика

Наличие весьма твердого, исчерпавшего запас пластичности тонкого слоя на передней поверхности инструмента создает, как показано выше, опасность возникновения хрупкого скола. Для повышения стойкости и работоспособности инструмента предлагается ввести после закалки операцию заточки метчика и последующую упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием. Заточку метчиков можно производить и по передней, и по задней поверхности. В данном случае заточку следует осуществлять, не снижая прочности зуба инструмента, по передней грани с толщиной снимаемого слоя 0,1 – 0,12 мм (см. рис. 3). Обычно принятая на практике [3] толщина при рассматриваемых в работе диаметральных размерах достигает 0,5 – 0,6 мм.

Известно [4], что упрочнение закаленных сталей со структурой мартенсита даже при незначительных степенях деформации приводит к повышению их прочности. Поставленную на предприятии-изготовителе задачу повышения степени деформации на 20 % решали технологическими методами, а именно обработкой передней грани инструмента микрошариками. Выбор режимов обработки, обеспечивающих требуемое повышение качества поверхности и, как следствие, увеличение ресурса работы метчика, производили по методике, приведенной в работе [5], где за относительную степень пластической деформации принята величина

$$U = \frac{L - d}{d},$$

где L и d – соответственно длина дуги сечения и диаметр пластического отпечатка микрошарика.

С учетом геометрической связи размеров L и d , физико-механических свойств контактируемых тел и скорости соударения формула трансформируется в следующий вид:

$$U = \frac{\pi \cdot \arcsin 2 \cdot \sqrt{k \cdot v \cdot \left(\frac{\gamma}{6gHB}\right)^{0.5} \cdot \left[1 - k \cdot v \cdot \left(\frac{\gamma}{6gHB}\right)^{0.5}\right]}}{360 \cdot \sqrt{k \cdot v \cdot \left(\frac{\gamma}{6gHB}\right)^{0.5} \cdot \left[1 - k \cdot v \cdot \left(\frac{\gamma}{6gHB}\right)^{0.5}\right]}} - 1,$$

где v – скорость полета микрошариков; γ – плотность материала микрошариков; HB – твердость поверхности обрабатываемого материала.

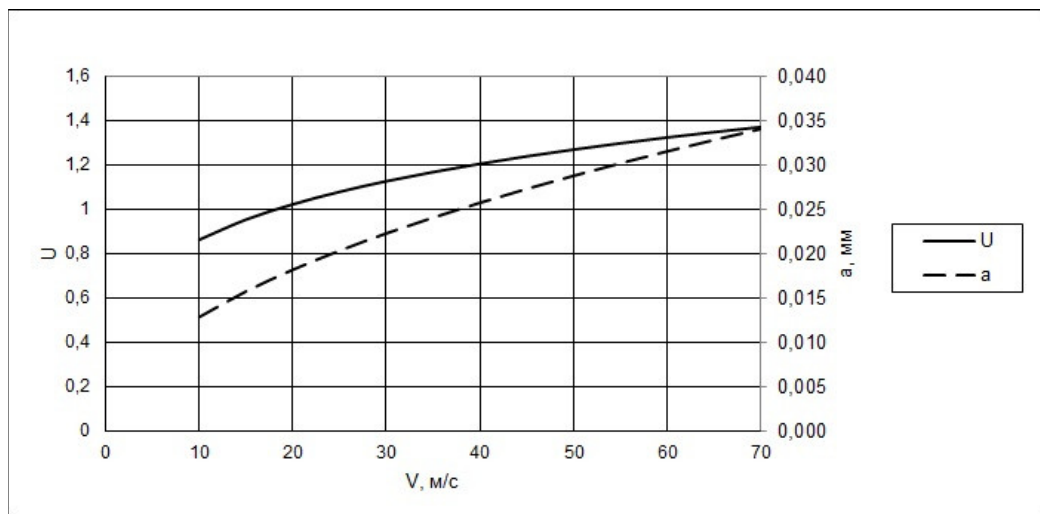
Твердость поверхностей резьбы 60 – 64 HRC эквивалентна твердости по Бринеллю 627 – 652 HB.

Соответствующую глубину наклепанного слоя находили по формуле

$$a = 3D \sqrt{k \cdot v \cdot \left(\frac{\gamma}{6gHB} \right)^{0.5}},$$

где D – диаметр микрошарика; k – коэффициент, учитывающий влияние многократности ударов на изменение глубины (из экспериментальных данных $k = 1,3 - 1,6$).

Вычисление скорости полета микрошарика исходя из заданной степени пластической деформации $U = 1,2$ производилось решением в Microsoft Excel. Графики зависимостей степени относительной пластической деформации U и глубины наклепанного слоя a от скорости полета микрошариков представлены на рис. 6.



Р и с. 6. Зависимость степени пластической деформации U и глубины наклепанного слоя a от скорости полета микрошариков

Время, минимально необходимое для обеспечения сплошности наклепа поверхности, входящей в ядро распыла дробы, рассчитывается по формуле [5]

$$t = \frac{F}{D R_z N},$$

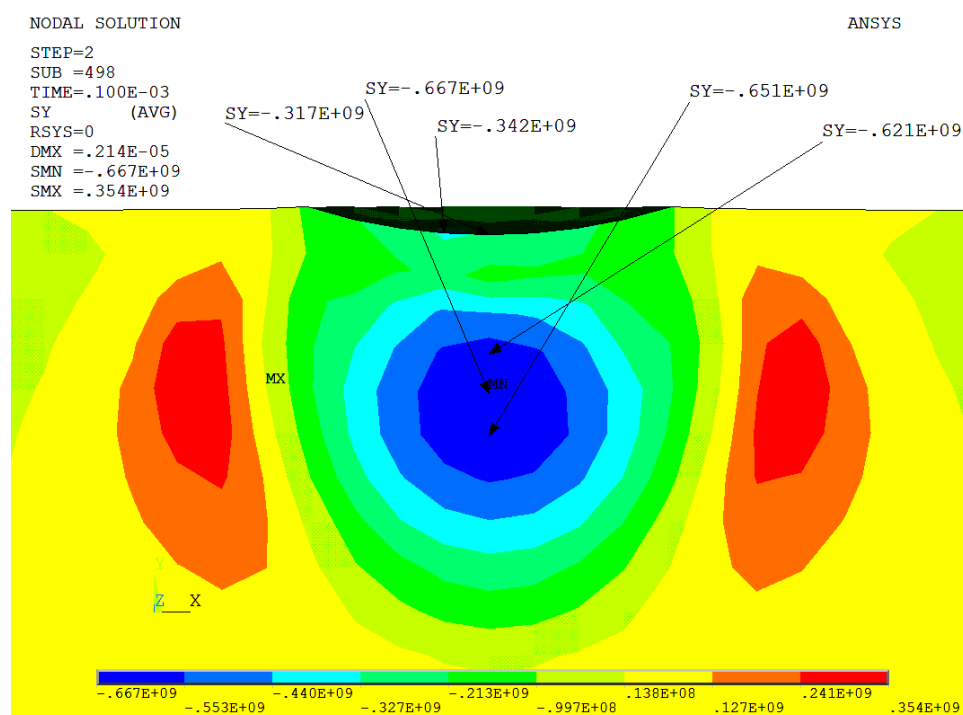
где $F = 5652 \text{ мм}^2$ – площадь поверхности, входящая в ядро распыла дробы; $D = 0,1 \text{ мм}$ – диаметр дробы; $R_z = 20 \text{ мкм}$ – исходная высота микронеровностей; $N = 74 \cdot 10^6 \text{ 1/с}$ – секундный расход микрошариков через сопло.

Расчеты показывают, что достаточно двух секунд, чтобы покрыть требуемую площадь отпечатками.

Определение остаточных напряжений в очаге пластически деформируемого слоя производилось с применением программного пакета ANSYS. При постановке объемной задачи предполагалось, что стальной шарик вдавлируется в рабочую грань метчика с заданной скоростью 40 м/с. Считали также, что повторные отпечатки, остающиеся на поверхности другими дробинками, не оказывают заметного влияния на толщину упрочняемого слоя и глубину залегания остаточных напряжений. К материалу линейно упрочняемой поверхности из цементированной стали 12ХН3А применялись и упругие, и пластические свойства. Переходные процессы в системе заканчиваются через 10 микросекунд после столкновения.

В качестве примера на рис. 7 показано распределение остаточных напряжений (в направлении, перпендикулярном к передней поверхности) в поверхностном слое после прямого удара микрошариком диаметром 0,1 мм. На глубине 14 – 18 мкм возникают наибольшие сжимающие остаточные напряжения $\sigma_y = 554 - 667$ МПа, а на дне пластической лунки (на обработанной поверхности) – $\sigma_y = 317 - 342$ МПа, что обеспечивает дополнительное упрочнение материала инструмента.

Аналогичным образом распределены остаточные напряжения сжатия в радиальном и осевом направлениях. На глубине 15 мкм они составляют $\sigma_x = \sigma_z = 1720$ МПа, на поверхности – $\sigma_x = \sigma_z = 566 - 579$ МПа.



Р и с. 7. Остаточные напряжения (МПа)

Итак, для повышения прочности рабочей поверхности метчика необходимо выполнить заточку его передней грани на глубину 0,12 мм, а затем выбрать следующие параметры обработки поверхности микрошариками: диаметр микрошариков – 0,1 мм; скорость их полета – 40 м/с; угол падения микрошариков – от 40° до 90°; минимально необходимое время для обеспечения сплошности наклепа поверхности, входящей в ядро распыла дроби, – 2 с.

Выводы

1. Наибольшие расчетные напряжения, превышающие предел прочности материала, возникают в вершине профиля резьбы метчика в момент его врезания в тело трубы. Пик разрушающих напряжений приходится на глубину 0,1 – 0,12 мм от передней грани инструмента.
2. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления ловильного метчика, заключающиеся во введении двух дополнительных операций – заточки по передней поверхности на указанную выше глубину и

последующего ее упрочнения микрошариками. Заточка позволяет удалить предельно охрупченный слой и подготовить поверхность под последующую обработку ППД.

3. Обработка микрошариками обеспечивает дополнительное упрочнение материала инструмента за счет формирования в поверхностном слое благоприятных, с эксплуатационной точки зрения, сжимающих остаточных напряжений. Максимальная величина этих напряжений достигает значений 1720 МПа и расположена на глубине 0,15 мм от поверхности. Непосредственно на поверхности формируются остаточные напряжения сжатия величиной до 580 МПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пустовойтенко И.П.* Предупреждение и ликвидация аварий в бурении. – М.: Недра, 1988. – 279 с.
2. Справочник конструктора-инструментальщика / Под общ. ред. В.И. Баранчикова. – М.: Машиностроение, 1994. – 560 с.
3. *Палей М.М.* Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М.М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
4. *Васильева А.Г.* Деформационное упрочнение закаленных конструкционных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 231 с.
5. *Кузнецов Н.Д.* Технологические методы повышения надежности деталей машин: Справочник / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2013 г.

CONSTRUCTION ANALYSIS AND MANUFACTURE TECHNOLOGY OF FISHING EQUIPMENT

T.A. Shashkina², Y.I. Kurguzov¹, I.E. Adeyanov¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaja st., Samara, 443100

² ЗАО «SibT ReidServis»
32, building 208, Zemets st., Samara, 443052

In this paper was developed a physical model of the formation process of a threaded connection, which provides the reliability that is sufficient enough for fixing the fishing tool in the pipe body and the given load capacity for workover, and also a model of the process of surface hardening of thread microbeads. The recommendations to improve the process of manufacture of fishing equipment have been proposed.

Keywords: *tap, drill pipe, fishing thread, hardening, microbeads, residual stress.*

Tamara A. Shashkina, Engineer.

Yury I. Kurguzov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Igor E. Adeyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.