

УДК 622.233.53

**ПОГРУЖНЫЕ ПНЕВМОУДАРНИКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

**А. А. Репин¹, Б. Н. Смоляницкий¹, С. Е. Алексеев¹,
А. И. Попелюх², В. В. Тимонин¹, В. Н. Карпов¹**

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: bsmol@mysd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса, 20, 630092, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрены основные пути повышения энергетических параметров погружных пневмоударников. Представлена конструктивная схема нового пневмоударника, работающего на высоком (до 3 МПа) давлении сжатого воздуха. Приведены результаты экспериментального исследования его рабочего цикла. Установлены требования к сталям для изготовления пневмоударников и режимам их термической обработки, обеспечивающие повышение долговечности деталей. Описаны результаты испытаний пневмоударников в производственных условиях.

Бурение, погружной пневмоударник, скважина, термическая обработка, прочность, надежность

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей составляющей технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, их добычи как подземным, так и открытым способом является бурение скважин в породном массиве.

Перспективы развития буровой техники связаны с ориентацией предприятий горного комплекса на улучшение показателей извлечения полезного ископаемого, повышение безопасности горных работ, особенно в условиях увеличения глубин разработки, развитие технологий добычи нетрадиционного углеводородного сырья, адаптированных к конкретным отечественным объектам первоочередного освоения.

В настоящее время (и, вероятно, в обозримом будущем) наиболее эффективным способом проходки скважин в массиве горных пород является ударно-вращательный, обеспечивающий бурение с минимальной энергоемкостью [1]. Для его реализации на горных предприятиях как в России, так и за рубежом получили развитие погружные, т. е. взаимодействующие непосредственно с забоем скважины, машины ударного действия — погружные пневмоударники. Они применяются в качестве рабочего органа бурового станка, который через систему штанг осуществляет подвод энергоносителя, передачу осевого усилия и вращающего момента.

Погружные пневмоударники и станок НКР 100 МП — это основное буровое оборудование на железорудных предприятиях России, используемое на подземных работах при проходке пучка нисходящих параллельных скважин для принудительного обрушения межэтажного блока. Годовой объем взрывных скважин только по одному блоку на рудниках Горной Шории и Хакассии достигает 20–30 тыс. пог. м.

В связи с ростом глубины проведения работ по добыче полезных ископаемых бурение осуществляется в условиях возросшего горного давления и высокой сейсмоактивности. Эти факторы вызывают интенсивные деформации массива, а от 20 до 50 % пробуренных скважин в подготавливаемом блоке разрушаются [2, 3], что влечет дополнительные затраты на бурение новых скважин взамен пришедших в негодность и приводит к ухудшению качества дробления горной массы. Поэтому актуально увеличение диаметра скважин за счет создания погружных пневмударников, способных с высокой производительностью бурить скважины диаметром 130 мм вместо прежних 110 мм, но при сниженном динамическом воздействии на станок НКР 100МП. В этом случае ожидаемое сокращение времени на бурение может составить около 30 %, что достаточно для быстрого и эффективного выхода из создавшейся ситуации [4]. Однако для этого требуется пневмударник с увеличенной, по меньшей мере, в 1.5 раза энергией удара, приходящейся на единицу площади забоя, по сравнению с применяемыми в настоящее время [3–6]. Об этом свидетельствуют результаты проведенных в ИГД СО РАН исследований, которые впервые показали, что существует пороговое значение энергии удара, обеспечивающее объемное разрушение массива с минимальной энергоемкостью, и критерий ее достижения [7]. Этот результат позволяет определить энергию удара, которую необходимо реализовать в погружном пневмударнике.

Для повышения производительности процесса разрушения одновременно с энергией необходимо увеличение частоты ударов, что еще больше усложняет задачу в условиях российских рудников, давление сжатого воздуха в магистрали которых не превышает 0.5 МПа. Решение этой задачи требует обоснования и применения в погружных ударных машинах энергонасыщенных рабочих циклов, которые не реализованы в полной мере ни в России, ни за рубежом.

На открытых горных работах пневмударное бурение взрывных скважин в СССР было широко распространено до начала 90-х годов прошлого века. Не менее 30 % добычи твердых полезных ископаемых осуществлялось этим способом. За рубежом бурение взрывных скважин погружными пневмударниками на открытых горных работах успешно развивается и применяется в настоящее время во все увеличивающихся объемах за счет использования буровых станков в комплекте с погружными пневмударниками высокого давления. Это объясняется тем, что применение сжатого воздуха высокого (до 3.5 МПа) давления стало общепризнанным направлением повышения энергии и частоты ударов пневмударников, а следовательно, и производительности бурения. В России этот способ был полностью вытеснен шарошечным. Причиной стало отсутствие передвижных компрессоров высокого давления (2–2.5 МПа) и устаревшая идеология компоновки буровых станков. В настоящее время пневмударное бурение в России возрождается через зарубежную технику, например буровые станки типа ROC — L6, L7, L8 всемирно известной фирмы Atlas Copco. Южная Корея и Китай поставляют станки и пневмударники своего производства. Стоит отметить высокую стоимость импортных пневмударников и коронок, имеющую тенденцию к дальнейшему увеличению.

По данным фирмы Atlas Copco, представленным на организованном ею семинаре в 2008 г. в Санкт-Петербурге, в России в настоящее время работает порядка 200 станков, оснащенных пневмударниками высокого давления. В среднем на каждый станок для обеспечения бесперебойной работы приходится 10 погружных пневмударников стоимостью от 3 до 7 тыс. евро каждый. С учетом других производителей бурового оборудования количество станков увеличивается, как минимум, до 300 шт. Общая потребность в пневмударниках составляет не менее 3000 шт. в год. При этом следует учесть, что на каждый пневмударник в год необходимо не менее 5 буровых коронок стоимостью 700–800 евро каждая. Приведенные цифры лишь приблизительно характеризуют потенциал импортозамещения по этому виду изделий.

Погружные пневмоударники, работающие на высоком давлении сжатого воздуха, в РФ не производят. Сохранение такой ситуации повлечет негативные последствия для горной отрасли России, поскольку закрепляет зависимость от импорта оборудования, запасных частей и технического обслуживания и не позволяет снизить себестоимость работ.

Анализ мирового опыта создания машин ударного действия показывает, что высокий уровень и частота приложения действующих нагрузок, контакт деталей с разрушаемым материалом и агрессивными средами приводят к быстрому выходу их из строя. В среднем ресурс работы отечественных погружных пневмоударников составляет 30–50 ч непрерывной работы, а зарубежных 100–150 ч.

Переход на повышенное (до 3.5 МПа) давление энергоносителя обеспечивает высокие энергетические параметры машины, но при этом увеличивает напряжения в соударяющихся деталях. Кроме того, существует потребность в создании сверхмалых пневмоударников диаметром менее 0.050 м, в которых вследствие незначительных площадей сечений деталей уменьшение напряжений и упрочнение материала деталей приобретают еще большую значимость.

Опыт, накопленный в ИГД СО РАН [1], показывает, что условия эффективного разрушения горной породы должны формироваться с учетом требований к прочности и долговечности элементов машин. Повышение этих параметров можно обеспечить при реализации комплексного подхода, заключающегося в создании эффективной конструкции на основе результатов физического и математического моделирования напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных деталей и разработки рациональной формы соударяющихся деталей. Важный компонент при этом — подбор материалов и технологических режимов их упрочнения, обеспечивающих наилучшее сочетание показателей прочности, трещиностойкости и износостойкости. Поэтому актуальны обоснование критериев подбора материалов и разработка эффективных технологий упрочнения.

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ПНЕВМОУДАРНИКА

Роль концентраторов напряжений выполняют отверстия, проточки, места сопряжений сечений разного диаметра и многое другое. В ИГД СО РАН установлено [5, 6], что для создания пневмоударника, не уступающего известным аналогам или превосходящего их, он должен иметь бесклапанную систему воздухораспределения с ударной парой “буровое долото – ударник” приближенно равных масс и равных акустических сечений с максимально возможным использованием рабочих площадей. Применение данного принципа в конкретных конструктивных схемах, а затем и в реальных конструкциях позволит ликвидировать отставание в этой области от конкурентов.

Для его реализации разработана конструктивная схема погружного пневмоударника с простой формой ударника, не имеющего внутренних каналов, что увеличивает его долговечность [8–10] (рис. 1). По предложенной схеме создан погружной пневмоударник ПВ 170М для работы на станках высокого давления.

Поскольку диаметр буримой скважины жестко лимитирует диаметр корпуса пневмоударника, то для обеспечения требуемой для объемного разрушения горной породы [7] энергии удара большое значение имеет величина рабочих площадей ударника со стороны камер рабочего и холостого хода, находящихся под давлением сжатого воздуха. В большинстве конструкций эти площади составляют 70–90 %. В представленной на рис. 1 схеме площадь поперечного сечения полости корпуса используется на 100 %, что позволяет достичь близких к максимально возможным значений энергии удара.

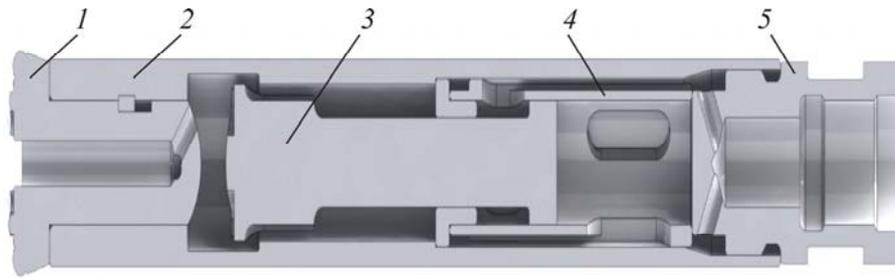


Рис. 1. Схема погружного пневмоударника ПВ 170М повышенного давления: 1 — коронка; 2 — корпус; 3 — боек; 4 — гильза; 5 — букса

К достоинствам схемы можно отнести отсутствие внутренних каналов в ударнике, что повышает его прочность и позволяет использовать при высоких значениях скорости его соударения с породоразрушающим инструментом. Важным является и то, что полость между ударником и коронкой является полостью атмосферного давления и не требует герметизации. Это позволяет максимально использовать кинетическую энергию бойка в момент удара по инструменту (коронке) из-за отсутствия воздушной подушки.

В пневматических ударных машинах с беззолотниковой системой воздухораспределения ударник является ее частью. Поскольку ударник — подвижная деталь, то сопряжения между ним и корпусными деталями выполнены с зазорами, через которые неизбежно происходят утечки сжатого воздуха.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОУДАРНИКА

Для определения их влияния на энергетические параметры пневмоударника в зависимости от величины сетевого давления энергоносителя в широком диапазоне его изменения осуществлены натурные эксперименты. Их объектом стал разработанный в ИГД СО РАН погружной пневмоударник ПВ 170 для проходки скважин диаметром 170 мм, способный работать в широком (0.6–2.0 МПа) диапазоне изменения давления сжатого воздуха. Эксперименты проводились на вертикальном лабораторном стенде ГД-251 (рис. 2) путем записи и последующей обработки диаграмм изменения давлений на протяжении рабочего цикла в рабочих камерах пневмоударника.



Рис. 2. Стенд ГД-251 с пневмоударником ПВ 170

Запись диаграмм осуществлялась при неизменном давлении сжатого воздуха в сети, равном 0.6 МПа, и суммарной площади S_{AB} сечения зазоров А и Б 0.587, 0.747, 1.207 и 1.527 см². Начало

и конец рабочего цикла определялись по отметчику удара, в качестве которого использовался акселерометр. Характерные диаграммы изменения давления в рабочих камерах представлены на рис. 3, а зависимость изменения энергии и частоты ударов от величины S_{AB} — на рис. 4.

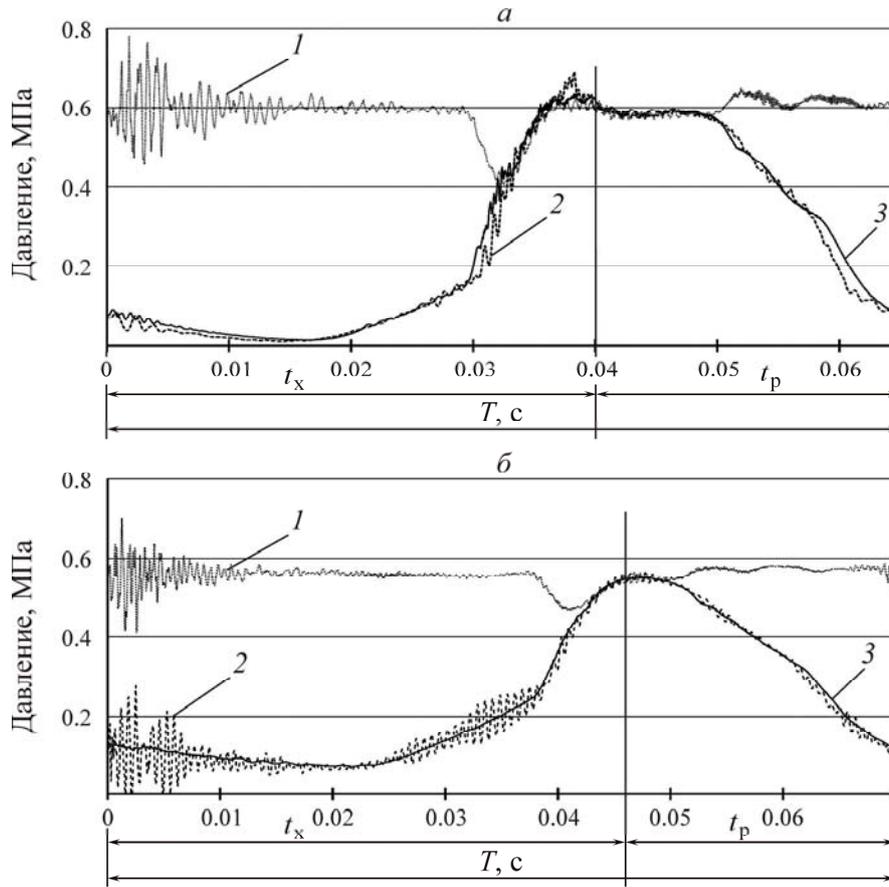


Рис. 3. Диаграммы давлений в рабочих камерах и камере холостого хода: *а* — $S_{AB} = 0.587 \text{ см}^2$; *б* — $S_{AB} = 1.527 \text{ см}^2$; 1 — давление p_x в камере холостого хода, МПа; 2 — давление $p_{к.р}$ в кольцевой камере рабочего хода, МПа; 3 — давление $p_{т.р}$ в торцевой камере рабочего хода, МПа; t_x , t_p — время холостого и рабочего хода соответственно, с; T — время цикла, с

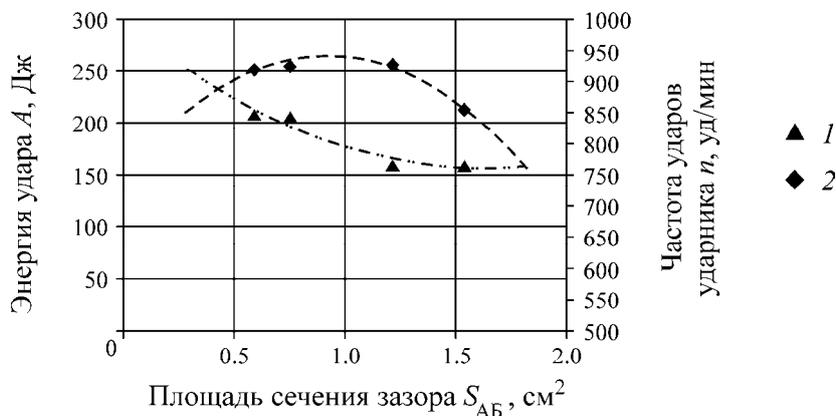


Рис. 4. Зависимость энергии единичного удара и частоты ударов ударника от площади сечения зазоров: 1 — энергия единичного удара, Дж; 2 — частота ударов ударника, уд/мин

Из индикаторных диаграмм и графиков видно, что суммарная площадь сечения зазоров оказывает существенное влияние как на величину энергии единичного удара, так и на частоту ударов, от которых напрямую зависит производительность пневмоударника. Максимальные значения ударной мощности пневмоударника при достаточных для эффективного разрушения горной породы энергии удара наблюдаются в диапазоне площадей зазоров от 0.5 до 1.25 см².

Из [11] следует, что с увеличением давления наблюдается резкий рост энергетических параметров. Ограничением этого роста являются достижимые на практике расход и давление воздуха и критическая скорость удара, которая для пневмоударников составляет 9–11 м/с. Поэтому обеспечение достаточного ресурса пневмоударников при таких скоростях соударения ударника с породоразрушающим инструментом является важной задачей.

ВЫБОР СТАЛИ И РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ

Высокий ресурс работы передовых моделей пневмоударников с высокими показателями ударной мощности обеспечивается не только конструктивным оформлением соударяющихся деталей, но и применением для их изготовления высокопрочных материалов. Стали для изготовления ударников должны обладать увеличенной прочностью, значительным сопротивлением усталостному разрушению и поверхностному выкрашиванию, а также высокой износостойкостью поверхности.

Анализ материалов, используемых лидером в области создания погружных пневмоударников высокого давления компанией Atlas Copco для изготовления деталей, свидетельствует о том, что ударники изготавливаются из среднеуглеродистых легированных сталей (табл. 1), близких по составу к отечественной марке 30X2H3MA. Повышенное содержание углерода в поверхностном слое ударника (0.78 % С) позволяет сделать вывод, что для обеспечения высоких показателей износостойкости ударники подвергаются цементации. В результате на их поверхности формируют упрочненный слой толщиной до 1.5 мм и твердостью HRC 57–59, обеспечивающий высокое сопротивление изнашиванию и обладающий повышенным сопротивлением зарождению усталостных трещин. Сердцевина ударника имеет структуру отпущенного мартенсита с твердостью HRC 44–46. Данные литературных источников и эксперименты, проведенные на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ, показывают, что такая структура стали обеспечивает наивысшие характеристики сопротивления усталостному разрушению [12–14].

ТАБЛИЦА 1. Химический состав сталей, применяемых для изготовления бойков новых энерговооруженных пневмоударников

Наименование	Содержание химических элементов, % (Fe-ост)										
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	W	V
Ударник Atlas Copco (сердцевина)	0.274	0.777	0.341	0.020	0.005	3.143	1.271	0.252	0.074	0.014	0.008
Ударник Atlas Copco (поверхность)	0.781	0.718	0.278	0.030	0.012	3.531	1.170	0.231	0.089	0.018	0.005
40X2H2MA	0.379	0.423	0.198	0.002	0.013	1.496	1.406	0.243	0.099	0.001	—

Другой путь повышения эксплуатационных характеристик деталей горных машин — изготовление их из сталей с низким содержанием неметаллических включений [15]. Именно это является отличительной особенностью материалов деталей погружных пневмоударников фирмы Atlas Copco. Загрязненность стали неметаллическими включениями соответствует 1 баллу по 162

ГОСТ 1778-70. Проведенные исследования показали, что неметаллические включения, содержащиеся в стали, негативно влияют на ее сопротивление усталостному разрушению при воздействии импульсов сжимающей нагрузки. Процессы усталостного разрушения стали происходят наиболее интенсивно, если в сжатом воздухе содержится вода, что может приводить к существенному снижению ресурса работы деталей ударных машин [16].

В связи с тем что получение высокочистых сталей является дорогостоящей технологической операцией, их применение для изготовления деталей пневмоударников не всегда экономически целесообразно. В ИГД СО РАН и на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ накоплен богатый опыт в изучении влияния неметаллических включений различного типа на усталостные свойства сталей и выработке рекомендаций по применению сталей различной степени загрязненности при производстве ударных механизмов. Для определения возможности использования сталей, имеющих в своей структуре неметаллические включения, проведена оценка формы, размеров неметаллических включений и их распределение в стали, при которых обеспечиваются требуемые усталостные характеристики и ресурс работы деталей. Это дает возможность на стадии изготовления осуществлять выбраковку некачественного материала [15].

Увеличение долговечности деталей неразрывно связано с качеством их поверхностей. Например, шероховатость поверхности ударника в пневмоударниках фирмы Atlas Copco не превышает Ra 0.32. Финишным операциям подвергаются практически все поверхности ударника, в том числе внутренние отверстия значительной глубины. Высокое качество обеспечивает низкую концентрацию напряжений в поверхностном слое и позволяет значительно замедлить процессы трещинообразования.

Задачи повышения ресурса высоконагруженных деталей пневмоударников связаны не только с применением высококачественных материалов, но и с их упрочнением. Они могут быть решены с помощью разрабатываемого совместно с НГТУ метода комбинированной термической обработки, направленного на повышение показателей конструктивной прочности сталей путем создания в них смешанных мартенсито-ферритных, мартенсито-перлитных и феррито-бейнитных структур [14].

Особенность метода термического упрочнения деталей ударных машин заключается в том, что в стали формируется смешанная мартенсито-бейнитная структура. Принципиальное отличие указанного способа обработки от известных методов — незавершенность процесса образования мартенсита. Мартенситные кристаллы окружены аустенитом, обеспечивающим релаксацию внутренних напряжений, в результате чего образующийся мартенсит становится менее напряженным и хрупким, что позволяет обеспечить высокий уровень прочности и трещиностойкости стали.

Формирование смешанной мартенсито-бейнитной структуры происходит при нагреве обрабатываемой детали до температуры аустенитизации, охлаждении в расплаве селитры до температуры, находящейся в диапазоне начала и окончания мартенситного превращения, и последующем нагреве до интервала бейнитного превращения (рис. 5). Время выдержки в каждом режиме должно быть достаточным, чтобы произошло выравнивание температуры в объеме детали. Эффективность подобного подхода доказана результатами научных исследований.

В результате проведенных исследований установлено, что зависимости от основных критериев, предъявляемых к материалу детали, — высокой прочности, твердости, ударной вязкости или трещиностойкости, целесообразно применять различные виды ее термического упрочнения, обеспечивающие наилучшее их сочетание. Так, для получения высокопрочных структур (с твердостью более 52 HRC) следует применять закалку с низким отпуском. При необходимости обеспечения высоких показателей надежности деталей в высокопрочном состоянии (42 – 52 HRC) целесообразно упрочнение стали по технологии термической обработки со смешанным мартен-

сито-бейнитным превращением аустенита. Изотермическая закалка с формированием в стали структуры нижнего бейнита обеспечивает оптимальное сочетание трещиностойкости и прочности стали твердостью 38–42 HRC [14].

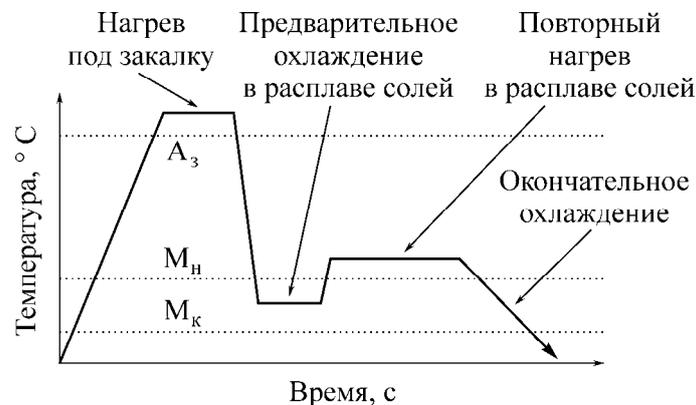


Рис. 5. Технологический процесс термической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита: A_3 — температура полного аустенитного превращения; M_n и M_k — температура начала и конца мартенситного превращения соответственно

Эксперименты показали, что создание структуры подобного типа позволяет в 1.5 раза повысить ударную вязкость и в 2 раза повысить трещиностойкость высокопрочной стали по сравнению с традиционными видами термической обработки (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Механические свойства сталей после различных способов термического упрочнения

Марка стали	Производитель	Твердость HRC	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Ударная вязкость, Дж/см ²	Долговечность, цикл	Скорость роста трещины при $K=10 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, 10^{-7} м/цикл
40ХН2МА (закалка и отпуск)	ИГД СО РАН	45	1267	1444	48	86400	1.5
40ХН2МА (ВТММБ)	ИГД СО РАН	45	895	1302	112	500700	0.2
30Х2Н3МА	Atlas Copco	44	1044	1579	89	62400	1

Результаты исследований использованы для изготовления деталей пневмоударника ПВ 170М. Ударник выполнен из высококачественной стали 40Х2Н2МА, термически упрочненной различными способами. В качестве базовой обработки применена традиционная закалка в масле с последующим отпуском при температуре 400°С. Ряд образцов упрочнен перспективной термомеханической обработкой со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита. Как видно из табл. 2, этот режим позволяет существенно снизить скорость роста трещин с одновременным сохранением ударной вязкости и увеличением долговечности.

ИСПЫТАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

После доводки конструкции пневмоударника ПВ 170М и внесения необходимых корректировок в технологию изготовления деталей он прошел широкую проверку в производственных условиях на объектах ОАО “Новосибирсквзрывпром”. Бурение скважин осуществлялось по

гранитам крепостью $f = 12 - 14$ по шкале Протодяконова на карьере “Борок” г. Новосибирска (рис. 6а). Использовался буровой станок SWDB165 шведской конструкции и китайского производства. Бурение проводилось при давлении сжатого воздуха в магистрали, равном 1.4 МПа. Замена буровой коронки в сравнении с импортной техникой оказалась проще и требовала меньше времени. Средняя механическая скорость при этом давлении составила 350 мм/мин. На том же станке осуществлялось бурение на Коенском каменном карьере Тогучинского р-на Новосибирской обл. по диабазам крепостью $f = 14 - 16$ (рис. 6б). В этих условиях зафиксирована большая частота ударов в сравнении с импортным пневмударником.



Рис. 6. Пневмударник ПВ 170М на буровом станке SWDB165 на карьере “Борок” г. Новосибирска (а) и на Коенском карьере (б)

Пневмударник ПВ 170М передан ООО “Горно-техническая компания “Сибирь” для эксплуатации на шведских буровых станках SM760D с давлением 1.6 МПа и ROC L8 с давлением 2.4 МПа для бурения на добычном карьере Искитимского карьероуправления пос. Ложки Новосибирской обл. по мраморизированным известнякам крепостью $f = 11 - 13$ по шкале Протодяконова.

В ходе работ пробурено 22 скважины диаметром 170 мм и глубиной до 16.5 м. Скорость бурения составила 400 мм/мин. В этих условиях проведено сравнительное бурение с пневмударником шведской конструкции SD6. Скорости бурения приведены на рис. 7. Анализ результатов показывает, что в усовершенствованной конструкции увеличены энергетические параметры. В сравнении с импортным пневмударником скорости бурения сопоставимы, а в ряде случаев скорость бурения пневмударником ПВ 170М превышает скорость бурения импортным.

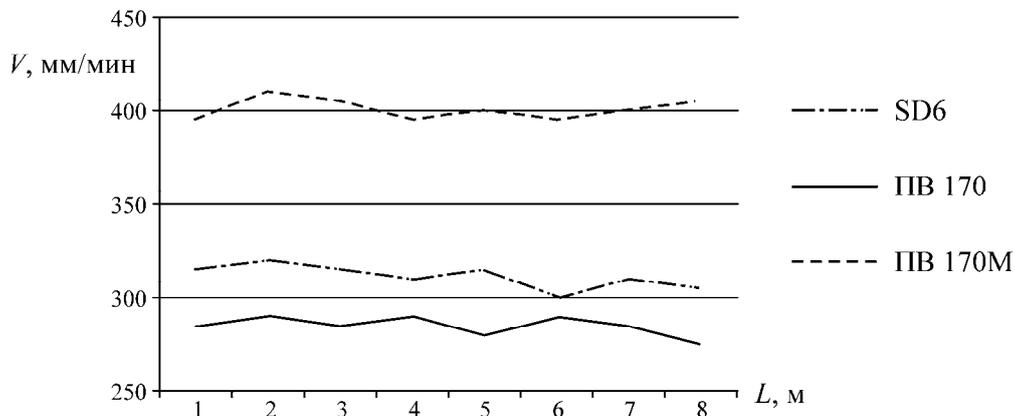


Рис. 7. Скорости бурения пневмударниками

Всего за время испытаний пневмоударником ПВ 170М пробурено более 600 пог. м скважин с сохранением работоспособности.

Новые результаты, полученные в ходе проделанной работы, обеспечили создание высокоэффективного энергонасыщенного бурового оборудования ударно-вращательного действия для проходки скважин в массиве прочных горных пород. Выпуск этого оборудования на предприятиях РФ и широкое применение в практике буровых работ усилит конкурентные позиции отечественной техники и создаст перспективы для развития прорывных технологий в горнодобывающей отрасли.

ВЫВОДЫ

Повышение скорости проходки скважин требует увеличения ударной мощности погружного пневмоударника и обеспечения порогового значения энергии удара для объемного разрушения породного массива с минимальной энергоемкостью при максимально возможной частоте ударов. Общеизвестным путем решения этой проблемы является применение сжатого воздуха высокого (до 3.5 МПа) давления.

Достижение необходимого ресурса пневмоударников целесообразно путем создания надежной и долговечной конструкции за счет придания рациональной формы наиболее нагруженным соударяющимся деталям, подбора материалов деталей и технологических режимов их упрочнения для наилучшего сочетания показателей прочности, трещиностойкости и износостойкости.

Разработана принципиальная схема пневмоударного механизма с простой формой ударника, не имеющего внутренних каналов, на основе которой создан экспериментальный образец погружного пневмоударника ПВ170 для работы на высоком давлении сжатого воздуха. Проведены экспериментальные исследования его рабочего цикла, в результате которых установлено рациональное сочетание геометрических размеров и зазоров в подвижных соединениях ударника с корпусом, обеспечивающее достижение высоких энергетических показателей.

В зависимости от основных критериев, предъявляемых к материалу детали, — высокой прочности, твердости, ударной вязкости или трещиностойкости целесообразно применять различные виды ее термического упрочнения. Так, для получения высокопрочных структур (с твердостью более 52 HRC) следует применять закалку с низким отпуском. При необходимости обеспечения высоких показателей надежности деталей в высокопрочном состоянии (42 – 52 HRC) целесообразно упрочнение стали по технологии термической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита.

Экспериментальный образец пневмоударника ПВ 170 испытан в производственных условиях при бурении взрывных скважин на открытых горных работах. В ходе испытаний получена скорость бурения до 400 мм/мин. Проведено сравнительное бурение с пневмоударником шведской конструкции SD6 (Швеция), показавшее, что скорости бурения сопоставимы, а в ряде случаев скорость бурения пневмоударником ПВ 170 превышает скорость импортного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоляницкий Б. Н., Репин А. А., Данилов Б. Б. и др. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / отв. ред. Б. Ф. Симонов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. № 43).

2. **Репин А. А., Алексеев С. Е.** Совершенствование схем и конструкций погружных пневмоударных расширителей скважин // Сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. “Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов”. — Новокузнецк, 2011.
3. **Репин А. А., Алексеев С. Е.** Разработка оборудования для проходки скважин увеличенного диаметра // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. III. Машиноведение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.
4. **Репин А. А., Алексеев С. Е.** Направления развития погружных пневмоударников // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. II. Машиноведение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
5. **Липин А. А.** Перспективные пневмоударники для бурения скважин // ФТПРПИ. — 2005. — № 2.
6. **Репин А. А., Алексеев С. Е.** Создание пневмоударников для работы на повышенном давлении энергоносителя // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. III. Машиноведение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.
7. **Тимонин В. В.** Оценка процесса разрушения горных пород при динамическом вдавливании группы инденторов с точки зрения нелинейной геомеханики // Тр. науч. конф. “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск, 2008.
8. **Пат. № 2090730 РФ.** Погружной пневматический ударный механизм / С. Е. Алексеев // Оpubл. в БИ. — 1997. — № 26.
9. **Пат. № 2343266 РФ.** Погружной пневмоударник / А. А. Репин, С. Е. Алексеев, Г. А. Пятнин // Оpubл. в БИ. — 2009. — № 1.
10. **П. м. № 121854 РФ.** Погружной пневмоударник / А. А. Репин, С. Е. Алексеев, В. Н. Карпов // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 31.
11. **Репин А. А., Дружинин М. М.** Резервы повышения предупредительной скорости в пневматических машинах ударного действия // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Том II. Машиноведение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009.
12. **Murakami Yukitaka.** Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions, Elsevier, 2002.
13. **Попелюх П. А., Никулина А. А., Попелюх А. И.** Влияние внешней среды на показатели надежности деталей горных машин, работающих в условиях динамического сжатия // Науч. вестн. НГТУ. — 2013. — № 4(53).
14. **Попелюх П. А., Попелюх А. И., Юркевич М. Р.** Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита // Обработка металлов. — 2013. — № 2.
15. **Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Теплых А. М.** Влияние неметаллических включений на долговечность ударных машин // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
16. **Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И.** Методы повышения надежности деталей ударных машин // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.

Поступила в редакцию 11/IX 2014