

УДК 622.02:621.8.031.6(0016)

**Л.Н. Федоров, С.А. Ермаков, Д.С. Вашенко, Р.М. Скрыбин**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
РАЗУПРОЧНЕНИЯ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД  
ПРИ НАГРЕВЕ ТРЕНИЕМ ФРИКЦИОННЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ КОРОНКИ**

*Приведены краткие сведения о результатах исследований изменения прочности горных породах при их нагреве и охлаждении, краткое описание стенда для проведения исследований по фрикционному разупрочнению пород и результаты экспериментальных исследований разупрочнения гранодиорита при нагреве трением фрикционных элементов термомеханической коронки.*

*Ключевые слова: разупрочнение, гранодиорит, лунка выкола, фрикционные элементы, фрикционный нагрев, пятно нагрева, твердость  $R_{\text{ш}}$ , поверхностный слой.*

**Семинар № 17**

---

**К**раткий обзор работ по исследованию разупрочнения горных пород при нагрев-охлаждении. Изучением разупрочнения горных пород при термическом воздействии нагрев-охлаждение в разное время занимались многие исследователи. Наиболее известны работы А.А. Галяса, А.П. Дмитриева, А.Н. Москалева, Э.Д. Бергмана, И.М. Фокеева, И.П. Мельничука и др. [1, 2, 3, 4, 5]. Многочисленными исследованиями установлено, что при охлаждении на воздухе многие породы не теряют прочности, достигнутой при нагреве. Это объясняется тем, что при медленном охлаждении напряжения сжатия успевают релаксировать и порода сохраняет внутри межкристаллитные связи и структуру. Иная картина вырисовывается при резком охлаждении водой или в воде. При таком охлаждении поверхностный слой нагретой породы мгновенно сжимается. Это приводит к разрыву межкристаллитных связей, образованию микротрещиноватости, смачива-

нию стенок микротрещин и расклиниванию их молекулами воды (эффект П.А. Ребиндера). Кроме физического вода оказывает и химическое воздействие. Диссоциация воды на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  делает воду высококислотной и химически активной. Благодаря этим процессам прочность породы снижается.

Влияние резкого охлаждения водой горных пород, нагретых водородным генератором в широком диапазоне температур, исследовал также Г.С. Бродов [6]. Он установил, что наибольшее разупрочнение большинства горных пород происходит при охлаждении в воде после нагрева выше 600-800 °С. Таким образом, для большинства пород охлаждение в воде после нагрева является исключительным фактором их разупрочнения.

Выполненный анализ опубликованных работ показывает, что на настоящий момент не изучено влияние термофрикционного нагрева, в том числе с последующим охлаждением потоком воды на изменение прочно-

сти горных пород, т.е. данный процесс является еще неисследованной областью разрушения горных пород.

**Экспериментальный стенд и аппаратура.** Экспериментальные исследования процесса фрикционного нагрева пород проводились на исследовательском стенде (рис.1), особенностью которого является то, что вращается образец породы (керна) при неподвижном инструменте (термофрикционной коронке). Следует также отметить, что фрикционные элементы коронки были изготовлены из стали, чтобы они не разрушали кольцевое пятно нагрева на образце и не оставляли на нем различные царапины, задиры и тем более кольцевые бороздки.

Стенд оборудован измерительно-регистрирующим комплексом на базе персонального компьютера и платы АЦП L-791. Для регистрации давления используются тензодатчики, наклеенные на силоизмеритель прессы. Температура поверхности образца контролируется термометром "Testo-935" с термопарой, а при нагреве выше 500 °С дополнительно контролируется бесконтактным пирометрическим датчиком «Пироцельс -001» с оптоволоконным светопроводом.

Достоинством пирометра является быстрота замера, порядка 0,01 сек., что позволяет зафиксировать изменение температуры в динамике и ее зависимость от усилия давления на образце.

**Петрографическое описание образцов гранодиорита.** Исследования проводились на образцах гранодиорита с месторождения «Талое». Это полнокристаллическая горная порода промежуточного состава между гранитом и кварцевым диоритом, состоящая из плагиоклаза (40-60%), калиевого полевого шпата (15-25), кварца (15%), сине-зеленой роговой



**Рис. 1. Стенд для исследования разрушения горных пород при фрикционном нагреве**

обманки (10-15%) и 3-5% биотита. Другие редкие минералы: сфен, черный рудный минерал (магнетит или титаномагнетит). Еще меньше – циркон, апатит в виде единичных мелких зернышек. Цветные минералы в гранодиорите представлены сине-зеленой роговой обманкой и бурым биотитом. По керну и по шлифам в разных направлениях (срезах) какие-нибудь трещинки, предпочтительная ориентированность анизотропных минералов не установлены.

**Проведение лабораторных исследований.** Исследования проводились на кернах диаметром 114 мм и высотой 7-10 см. Параметры режима фрикционного нагрева поверхности образцов гранодиорита принимались исходя из следующих соображений. Скорость вращения образца породы была принята по возможности высокой - 500 об/мин, что соответствует верхнему оптимальному параметру

режима бурения термофрикционной коронкой. Подача воды для охлаждения коронки принята равной 1,35 л/мин из условия нагрева породы до 700 °С при минимальном осевом усилии. Охлаждение нагретой породы осуществлялось подачей воды в объеме 0,3 л/мин по отдельному трубопроводу.

В процессе экспериментальных исследований было проведено 5 опытов. Один опыт включал семь циклов нагрева в диапазоне температур от 100 до 700 °С с интервалом 100 °С и еще семь циклов нагрева с последующим охлаждением в том же диапазоне температур. При этом в каждом опыте перед каждым циклом нагрева без охлаждения образца гранодиорита измерялась его твердость, т.е. семь раз. Измерение твердости поверхностного слоя образцов производилось измерителем твердости на базе механического пресса с усилием давления до 50 кН с передачей на компьютер сигналов от датчиков усилия и глубины внедрения индентора в породу. Каждое измерение включало шесть замеров индентором измерителя.

Вначале твердость измерялась при комнатной температуре в центре торца образца породы, затем образец устанавливался в кернодержатель станда и нагревался трением коронки со сплошным фрикционным кольцом до заданной температуры. Потом на образце с использованием твердомера через 60° выполнялось 6 замеров твердости Рш пятна нагрева. После этого с торца образца шлифовалось пятно нагрева и снова торец нагревался на стенде до той же температуры и затем охлаждался водой. Новые замеры выполнялись между старыми лунками выкола от индентора твердомера. Всего при измерении твердости образцов гранодиорита при комнатной температуре было

проведено 210 замеров индентором измерителя. После статистической обработки данных получены следующие показатели: среднее значение твердости Рш = 4980 МПа; среднее квадратическое отклонение (стандарт)  $\sigma = 550$  МПа; доверительный интервал  $(4980 \pm 1430)$  МПа; коэффициент вариации  $K_{\text{вар}} = 11\%$ .

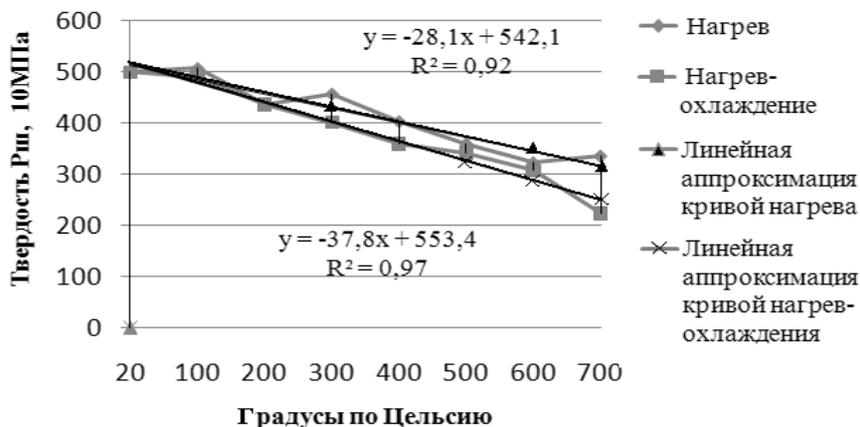
Все данные по пяти опытам для удобства сравнения величины разупрочнения приведены к среднему значению твердости образцов при комнатной температуре (5000 МПа). По этим данным вычислены средние значения твердости гранодиорита при нагреве и при нагрев-охлаждении. Результаты этих вычислений приведены в таблице.

**Анализ результатов.** По данным табл. построены экспериментальные кривые изменения твердости гранодиорита при нагреве и нагрев-охлаждении (рис. 2).

Полученные зависимости хорошо аппроксимируются линейной функцией, которая позволяет вывести количественные соотношения разупрочнения гранодиорита при нагреве и нагрев-охлаждении. Так можно сделать вывод о том, что при нагреве до 700 °С твердость гранодиорита снижается в 1,8, а при нагрев-охлаждении – в 2,0 раза.

**Твердость гранодиорита при нагреве и нагрев-охлаждении по усредненным данным пяти опытов**

№	Температура,	Твердость Рш, 10МПа	
		Нагрев	Охлаждение
1	20	500	500
2	100	508	482
3	200	437	436
4	300	458	398
5	400	404	307
6	500	360	330
7	600	323	304
8	700	336	228



**Рис. 2. Зависимость твердости гранодиорита от температуры**

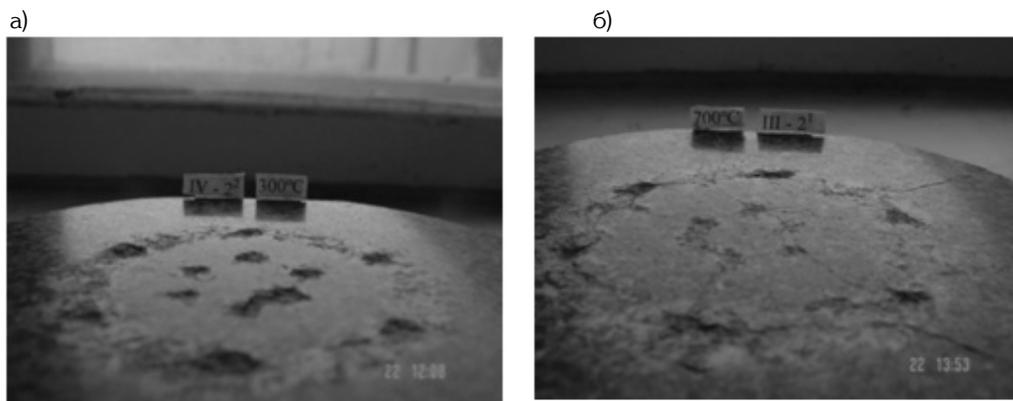


**Рис. 3. Образование мелких лунок выкола и других углублений на кольцевом пятне нагрева** (в центре образца и по кольцевому пятну нагрева видны лунки выкола от внедрения индентора измерителя твердости)

Из рис. 2 также видно, что при охлаждении образца после достижения температуры 600 °С и более твердость гранодиорита снижается ниже 300×10 МПа, что обеспечивает эффективное применение твердосплавных режущих элементов в термофрикционной коронке [7]. При охлаждении после 300 °С бурение в гранитоподобных породах возможно, но будет быстро изнашиваться твердосплавный режущий элемент в термофрикционном инструменте.

Экспериментальные исследования и наблюдения пятна нагрева после термофрикционного воздействия на образец уже при 200 °С и давлении на образец в 1.3 кН показали, что происходит не только разупрочнение поверхностного слоя образца гранодиорита, но и разрушение этого слоя под торцом фриktionного элемента в виде лунок выкола и углублений от отделения мелких чешуек различной формы (рис. 3).

При более высоких температурах и давлениях разрушение принимает более широкий масштаб (рис. 4 а, б). Этот результат является важным, так как ранее было известно, что разрушение шелушением и лунками выкола происходит под действием сверхзвуковой высокотемпературной струи газа [1]. А в наших опытах исследования проводились в условиях со значительно меньшими параметрами термомеханического воздействия. Таким образом, в термофрикционном породоразрушающем инструменте резец отделяет не только разупрочненный, но и ослабленный лунками выкола и углублениями от отделившихся мелких чешуек слой. Этот вывод имеет также важное конструктивное значение, так как из него становится ясным, что из-



**Рис. 4. Картина разрушения породы под торцом фрикционного элемента коронки:** а – температура фрикционного нагрева – 300 °С, усилие давления на образец – 2.0 кН; б - температура фрикционного нагрева – 700 °С, усилие давления на образец – 3.1 кН

под торца фрикционного элемента должны своевременно удаляться продукты разрушения. Такое требование исходит из того, что между коронкой и образцом образуется промежуточный мелкодисперсный слой из продуктов разрушения, по которому фрикционный элемент будет скользить, вследствие чего уменьшится выделение тепла.

#### **Вывод**

В результате проведенных экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Установлена линейная зависимость изменения твердости гранодиорита от температуры при термофрикционном нагреве и нагрев-охлаждении водой в диапазоне температур от 100 до 700 °С. При этом при темпе-

ратуре свыше 600 °С твердость поверхностного слоя гранодиорита линейно снижается в 1,8, а после охлаждения потоком воды – в 2 раза.

2. Выявлен характер разрушения пятна нагрева в зоне контакта фрикционного элемента коронки с породой, который имеет вид мелких лунок выкола и углублений от шелушения, создающих условия для эффективного отделения разупрочненного слоя крепких пород режущим элементом породоразрушающего инструмента.

Полученные результаты имеют прикладное значение при обосновании конструктивных параметров термофрикционного породоразрушающего инструмента и оптимальных режимов бурения скважин в гранитоподобных породах.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Галяс А.А. Основы термомеханического разрушения горных пород [Текст] / А.А. Галяс, С.А. Полуянский. – Киев: Наук. Думка, 1972. – 290 с.

2. Бергман Э.Д. Термическое разрушение горных пород плазмобурами [Текст] /Э.Д. Бергман, Г.Н. Покровский. – Новосибирск, Наука. – 1971. – 127 с.

3. Москалёв А.Н. Интенсификация процессов разрушения горных пород [Текст] / А.Н. Москалёв, С.Я. Сологуб, Л.М. Васильев и др. – М.: Недра, 1978. – 208 с.

4. Мельничук И.П. Исследование температуры нагрева и последующего охлаждения на механические свойства горных пород [Текст] /И.П. Мельничук, В.М. Фокеев. //Разведка и охрана недр. – 1965. - №1

5. *Фокеев В.М.* О некоторых причинах изменения механических свойств горных пород при термическом воздействии и последующем охлаждении [Текст] /В.М. Фокеев, И.П. Мельничук. //Изв. вузов. – Геология и разведка. – 1965. – №5. – С.134-139.

6. *Бродов Г.С.* Основы термомеханического колонкового бурения [Текст] / Г. С.

Бродов. – С.-Петербург: Изд-во ВИТР, 2001. – 56 с.

7. *Блинов Г.А.* Справочное руководство мастера геологоразведочного бурения [Текст] /Г.А. Блинов, В.И. Васильев, Ю.В. Бакланов и др. – Л.: Недра, 1983. – 400 с. **ГИАБ**

### Коротко об авторах

*Ермаков С.А.* – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН,

[s.a.ermakov@igds.ysn.ru](mailto:s.a.ermakov@igds.ysn.ru)

*Федоров Л.Н.* – научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, [s.v.panishev@igds.ysn.ru](mailto:s.v.panishev@igds.ysn.ru)

*Вашенко Д.С.* – ведущий инженер, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, [s.v.panishev@igds.ysn.ru](mailto:s.v.panishev@igds.ysn.ru)

*Скрябин Р.М.* – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Якутский государственный университет им. М.К. Амосова, [unir@sitc.ru](mailto:unir@sitc.ru)



## РУКОПИСИ,

### ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Подзноев Г.П.**, к.г.-м.н., доцент Симферопольского инженерно-педагогического университета

**Зубков А.А.**, канд. техн. наук, доцент, главный технолог ООО «Экомет Плюс»,

E-mail: [trbusiness7@mail.ru](mailto:trbusiness7@mail.ru)

АКТИВАЦИЯ РУДНОГО МАТЕРИАЛА НА СТАДИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА (763/06-10 от 29.04.2010 г.) 11 с

*Рассматривается роль механоактивации рудного материала перед восстановительным обжигом в геаутоклаве. Основным фактором механоактивации следует отнести активную энергетику и повышенную химическую активность поверхностей, образующихся в результате разрывных деформаций кристаллических решеток в момент ударных воздействий мелющих тел при измельчении. Максимально использовать этот эффект возможно, если измельчение вести в жидкой или газовой среде восстановителя (жидкие и газообразные углеводороды, водород).*

*Ключевые слова: механоактивация, восстановление термохимическое, геаутоклав, рудоподготовка, агломерация, оксиды металлов, металлизированный концентрат.*

**Podsnoev G.P., Zubkov A.A.** ACTIVATION OF AN ORE MATERIAL ON STAGES OF CRUSHING AND ITS INFLUENCE ON EFFICIENCY OF THERMOCHEMICAL RESTORATION OF METAL

*The role mechanical activation an ore material before regenerative roasting is considered in a geauroclave. Major factor of mechanical activation it is necessary to carry active power as a result of explosive of shock influences of drinding bodies at crushing. As much as possible to use this effect probably if crushing to conduct in the liquid or gas environment of a reducer (liquid and gaseous hydrocarbons, hydrogen).*

*Key words: mechanical activation, thermochemical restoration, geauroclave, ore preparation, agglomeration.*