

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 620.17:679.85

ОЦЕНКА УДЕЛЬНОЙ ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ И УРОВНЯ ШУМА В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ ПРИРОДНОГО КАМНЯ СОГЛАСНО ЗНАЧЕНИЯМ ТВЕРДОСТИ ПО ЛИБУ

Г. Экинджиоглу¹, Д. Акбай²

¹Университет Ахи Эвран,

E-mail: gokhanekincioglu@gmail.com, 40300, г. Каман, Турция

²Университет Чанаккале 18-го Марта, 17400, г. Чан, Турция

Определены значения твердости по Либфу, Шору и Шмидту для различных образцов карбонатных пород. При помощи методов простой и множественной статистической регрессии рассмотрены соотношения между значениями твердости и параметрами обрабатываемости резанием (удельная энергия резания и уровень шума). Определено, что твердость по Либфу может быть альтернативой твердости по Шору и Шмидту, так как позволяет оценить удельную энергию резания и уровень шума.

Природный камень, твердость по Шору, твердость по Шмидту, твердость по Либфу, удельная энергия резания, уровень шума.

DOI: 10.15372/FTPRI20230303

Обработка природного камня занимает важное место в производстве облицовочных материалов. Первичная обработка камня напрямую влияет на дальнейшие работы: калибровку, полировку, обработку поверхности и т. д. Качество резки блоков природного камня зависит от выбранных методов резания, а также оборудования и инструментов.

При производстве облицовочных материалов широко распространены циркулярные пилы для резания природного камня [1]. Эффективность резания циркулярной пилой с алмазным диском обусловлена следующими параметрами: скорость вращения диска, величина подачи, глубина резания, направление резания, расход охлаждающей воды, а также конструктивные параметры пилы [2]. Большое значение в процессе резания имеют физико-механические свойства обрабатываемого камня, а также содержание в нем твердых минералов.

Твердость — одна из характеристик минералов, образующих природный камень. Твердость камня представляет собой сопротивление, которое оказывает его поверхность истиранию или царапанию. Так как минералы входят в состав породы, то значения их твердости определяют твердость камня в целом [3]. Технологические свойства породы могут быть определены и оценены множеством испытаний, среди которых косвенные методы самые распространенные из-за легкости в применении. Они не требуют значительных затрат и быстро дают результат [4].

Твердость горных пород не используется напрямую в качестве входного параметра в различных инженерных проектах, она применяется с целью косвенной оценки механических свойств или для сравнения породы с другими материалами [5]. Так как твердость отражает внутреннюю структуру породы, во многих научных работах значения поверхностной твердости горных пород рассматривались как важные составляющие оценки прочности, буримости и обрабатываемости резанием [2].

Для определения твердости горных пород используются три группы методов. Первая группа включает испытания твердости по вдавливанию (по методу Бринеля, Роквелла, Викерса, Кнупа), вторая группа относится к динамическим испытаниям, или испытаниям на отскок (метод Шора, Шмидта), третья группа представляет собой испытания твердости по царапанию (метод Мооса) [6, 7]. Определение твердости динамическими испытаниями осуществляется путем измерения отскока предмета, ударяющегося о поверхность породы или падающего на нее. Эта величина позволяет оценить энергетические потери, приходящиеся на образование трещин в породе и на пластическую деформацию в точке воздействия [8]. На протяжении долгого времени наиболее распространенными инструментами измерения твердости горных пород по отскоку остаются склероскоп Шора С-2 (HSC) и молоток Шмидта типа L (HSL). Определение твердости по Либу было предложено в середине 1970-х гг. для измерения твердости на поверхности металлов [9]. В последние годы этот метод становится более распространенным, при этом он часто применяется при изучении геоматериалов, таких как горные породы и природные камни [10]. Благодаря цифровой репрезентации результатов, измерению твердости в большом диапазоне, более высокой точности по сравнению с другими методами и относительной экономичности данный метод позволяет проводить быстрые измерения [11].

Определение параметров обрабатываемости горных пород является крайне трудоемким процессом из-за необходимости изучения крупногабаритных образцов, сложности поддержания оптимальных условий проведения испытаний, а также ввиду высоких финансовых и временных затрат. В научной литературе представлено большое количество работ, посвященных оптимизации процесса резания природного камня, а также оценке энергии и производительности [12–23].

Цель настоящей работы — оценка удельной энергии резания и уровня шума на основе значений твердости.

ПАРАМЕТРЫ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ПРИРОДНЫХ КАМНЕЙ РЕЗАНИЕМ

В ходе аналитического обзора выявлены следующие основные параметры обрабатываемости природных камней: сила резания (нормальная и тангенциальная), удельный износ, удельная энергия резания и уровень шума.

Удельная энергия резания представляет собой количество энергии, необходимое для резания единицы объема породы. Важное значение для процесса резания имеют максимальная режущая скорость и минимальная удельная энергия. Исходя из этого, эффективность резания может быть измерена и оценена на основе удельной энергии [17]. Большое внимание в промышленном производстве уделяется повышению объема производства в единицу времени, энергопотреблением в процессе резания пренебрегают. Однако экономическая целесообразность резания основывается на максимальном объеме выполнения работ при минимальном энергопотреблении в единицу времени [13].

Интенсивность шума, создаваемого в процессе резания циркулярными пилами, зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Если режущее оборудование и режущий инструмент находятся в исправном техническом состоянии, то уровень шума позволяет оценивать качество данного процесса [19]. Следовательно, для оценки эффективности резания важно определять параметры обрабатываемости, такие как удельная энергия и уровень шума.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования использовались 12 образцов природного камня карбонатных пород, добытых в различных регионах Турции. В табл. 1 представлены геологическое происхождение и места добычи рассматриваемых образцов. Определены их физико-механические свойства и измерена твердость по Шору, Шмидту, Либу тремя различными измерителями твердости. Выполнены испытания резания при одинаковых условиях, в ходе которых были измерены и зарегистрированы значения удельной энергии резания и уровня шума. Исследования проводились в лаборатории технологии обработки природного камня в университете им. Сулеймана Демиреля и в лаборатории анализа природного камня в колледже г. Каман на базе Университета Ахи Эвран.

ТАБЛИЦА 1. Образцы природного камня

Образец	Код образца	Геологическая природа	Место добычи	Источник
Ağlasun Beige	B-1	Осадочная	Бурдур	[25]
Tundra Gray	B-2	Осадочная	Афьон	[25]
Burdur Beige	B-3	Осадочная	Бурдур	[25]
Karia Beige	B-4	Осадочная	Бурдур	[24]
Naçılar Beige	B-5	Осадочная	Бурдур	[24]
Marmara Gray	M-1	Метаморфическая	Балыкесир	[25]
Tiger Skin	M-2	Метаморфическая	Афьон	[25]
Muğla White	M-3	Метаморфическая	Мугла	[25]
Bucak Travertine	T-1	Осадочная	Бурдур	[25]
Denizli Travertine	T-2	Осадочная	Денизли	[25]
Simena Limra	K-1	Осадочная	Анталия	[24]
Calcareous tuff	K-2	Осадочная	Денизли	[24]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Минералогический анализ. В ходе минералогического анализа выявлено, что образцы карбонатной породы можно разделить на следующие группы: бежевая, мраморная, травертиновая и известняковая (рис. 1). Образцы бежевой группы природного камня (B-1, B-2, B-3, B-4, B-5) состоят из мелко- и среднезернистого микритового-спаритового цемента и интракластовых, кальцитовых минералов. Трещины в таком камне заполнены вторичными кальцитовыми минералами. Мраморная группа образцов (M-1, M-2 и M-3) представляет собой средне-крупные кристаллические кальциты без микротрещин. В составе образцов травертиновой и известняковой группы находятся среднезернистые кальцитовые минералы. В образцах T-1, T-2, K-1 и K-2 обнаружены полости расплава.

Физико-механические свойства образцов. Определены следующие физические свойства образцов природного камня: вес единицы объема (UVW) [26], скорость распространения ультразвука V_p [27] и абразивная стойкость по Беме (BAR) [28]. Затем устанавливались следующие механические свойства образцов природного камня: прочность на одноосное сжатие (UCS) [29], прочность на изгиб (FS) [30], прочность на растяжение бразильским методом (BTS) [31] и индекс точечной нагрузки ($I_{s(50)}$) [32] (табл. 2).

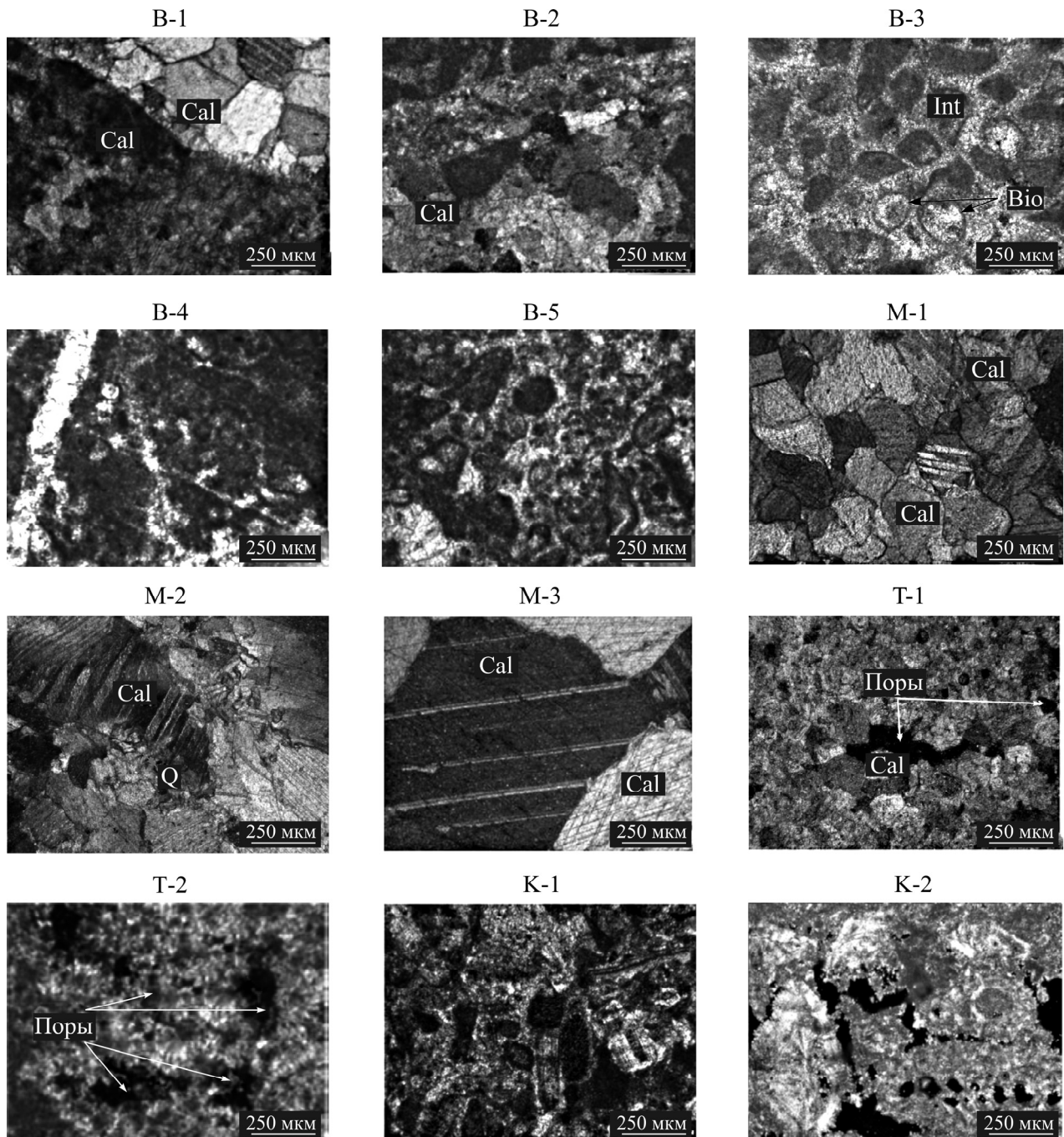


Рис. 1. Изображения шлифов образцов природного камня: Cal — кальцит, Q — кварц, Int — интракласт, Bio — биокласт

Твердость образцов. Для измерения твердости на поверхности образцов натурального камня использовались следующие инструменты: склероскоп Шора типа С-2, молоток Шмидта типа L и твердомер Либа. Измерения твердости по Шору (SH) выполнены в соответствии со стандартом [33], рекомендованным в [34]; измерения твердости по Шмидту (SCH) основывались на стандартах [31], изложенных в [24, 25]. В отсутствии принятого стандарта определения твердости горных пород по Либу (HL) исследования выполнялись с учетом стандарта измерения твердости по Шору из-за схожести методологии проведения измерений. Для определения твердости по Либу на каждом образце выполнено 20 ударов бойком и рассчитано среднее арифметическое данных.

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические свойства образцов природного камня

Код образца	UVW, г/см ³	V_p , м/с	BAR, см ³ /50 см ²	UCS, МПа	BTS, МПа	$I_{s(50)}$, МПа	Источник
B-1	2.682	5521	13.0	109.8	5.6	4.66	[25]
B-2	2.652	5868	14.5	145.5	7.0	5.39	[25]
B-3	2.677	5705	11.6	129.9	8.0	5.33	[25]
B-4	2.688	5849	17.0	130.6	8.1	3.38	[24]
B-5	2.690	5997	15.1	92.3	6.7	6.51	[24]
M-1	2.706	3577	21.3	74.6	6.0	3.26	[25]
M-2	2.710	4720	29.8	70.3	5.4	3.46	[25]
M-3	2.715	4408	24.0	85.7	4.7	3.52	[25]
T-1	2.485	4257	28.0	60.7	4.4	3.99	[25]
T-2	2.384	4425	29.0	62.5	3.4	3.58	[25]
K-1	2.415	4362	40.8	34.9	3.9	3.21	[24]
K-2	2.013	3635	40.9	18.3	2.1	1.51	[24]

В табл. 3 представлены измеренные значения твердости образцов природного камня.

ТАБЛИЦА 3. Твердость образцов природного камня

Код образца	SH	SCH	HL
B-1	56.6 [25]	46.0 [25]	599.7
B-2	53.6 [25]	52.0 [25]	638.4
B-3	62.6 [25]	49.6 [25]	644.8
B-4	61.5 [24]	42.3 [24]	648.0
B-5	63.0 [24]	49.0 [24]	625.2
M-1	41.6 [25]	43.0 [25]	533.5
M-2	43.5 [25]	38.5 [25]	582.6
M-3	47.5 [25]	39.0 [25]	581.0
T-1	36.7 [25]	34.6 [25]	528.3
T-2	43.9 [25]	32.6 [25]	512.3
K-1	31.5 [24]	23.4 [24]	498.3
K-2	14.6 [24]	23.9 [24]	421.5

Параметры обрабатываемости образцов. Испытания резанием выполнены на призматических образцах $50 \times 100 \times 200$ мм с целью определения удельной энергии резания и уровня шума. Работы проводились при следующих характеристиках: глубина резания 20 мм, окружная скорость режущего диска 60 м/с, скорость подачи 0.5 м/мин, которые не изменялись.

Для расчета удельной энергии резания определены значения мгновенной мощности в разные моменты испытания и построен график (рис. 3), по которому найдены значения потребляемой мощности в режиме холостого хода и в режиме полной нагрузки. Разница между этими двумя значениями является полезной мощностью, расходуемой на резание:

$$P_{\text{net}} = P_k - P_b, \quad (1)$$

где P_{net} — полезная мощность, расходуемая на резание, Вт; P_k , P_b — потребляемая мощность при полной нагрузке резания и в режиме холостого хода соответственно, Вт.

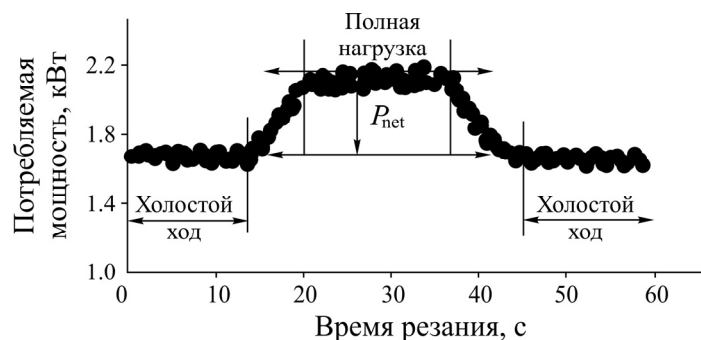


Рис. 3. Зависимость потребления мощности при резании от времени

Значения полезной мощности и удельной энергии, потребляемой в процессе резания, определены согласно [25]. Значения удельной энергии резания рассчитаны следующим образом:

$$SCE = \frac{P_{\text{net}}}{0.1666 h W_s V_i}, \quad (2)$$

где SCE — удельная энергия резания, Дж/мм³; h — глубина резания, мм; W_s — ширина режущего диска, мм; V_i — линейная скорость резания, см/мин.

Не вся потребляемая энергия приходится непосредственно на резание. Часть этой энергии расходуется на нагрев и генерацию шума. Уровень шума в процессе резания зависит от эксплуатационных параметров режущего оборудования и свойств камня. Так как в ходе испытаний эксплуатационные параметры оборудования не изменялись, уровень шума зависел только от свойств образцов природного камня [35].

В работе использован шумомер СЕМ DT-8852. Расстояние между местом резания природного камня и местом измерения уровня шума не изменялось и составляло 2 м. Уровень шума определялся 5 раз в секунду. Полученные данные записывались на компьютер, который был связан с шумомером. Испытания образцов выполнены при одинаковых условиях согласно [25]. После испытаний рассчитывались удельная энергия резания и уровень шума (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Параметры обрабатываемости образцов природного камня резанием

Код образца	Удельная энергия резания, Дж/мм ³	Уровень шума, дБ
В-1	0.881	94.43
В-2	0.976	95.03
В-3	1.108	94.57
В-4	0.904	94.22
В-5	0.858	93.88
М-1	0.701	94.13
М-2	0.691	92.75
М-3	0.735	95.06
Т-1	0.519	93.84
Т-2	0.482	93.20
К-1	0.375	91.00
К-2	0.152	90.80

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Соотношения между значениями твердости по Либу, Шору, Шмидту. Для прогнозирования физико-механических свойств породы большое значение имеет поверхностная твердость. Определение твердости горных пород обычно проводилось по Шору и по Шмидту. Однако

в последние годы становится более распространенным измерение твердости по Либу благодаря цифровой репрезентации результатов, измерению твердости в большом диапазоне, более высокой точности по сравнению с другими методами при относительной экономичности.

Методом простой статистической регрессии получены соотношения между значениями твердости по Шору, Шмидту и Либу образцов природного камня (рис. 4). На основании соотношений с высоким уровнем корреляции выявлено, что твердость по Либу может рассматриваться в качестве альтернативы твердости по Шору и твердости по Шмидту для карбонатных горных пород.

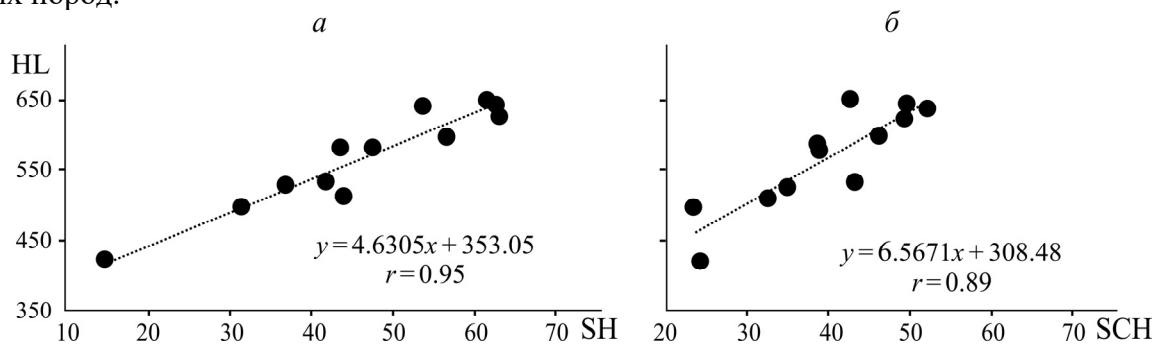


Рис. 4. Соотношение значений твердости по Либу со значениями твердости по Шору (а) и по Шмидту (б)

Соотношение между удельной энергией резания и значениями твердости по Либу, Шору, Шмидту. На предприятиях, занимающихся обработкой природного камня, предварительное определение удельной энергии резания — важный этап для обеспечения эффективности и экономической целесообразности процесса. Испытания, позволяющие прямым образом определить обрабатываемость горных пород резанием, сложны в исполнении и требуют специализированного оборудования, большого количества образцов, значительных финансовых и временных затрат.

В данном исследовании с помощью метода простой статистической регрессии рассмотрены и оценены соотношения между значениями поверхностной твердости природного камня и удельной энергии (рис. 5).

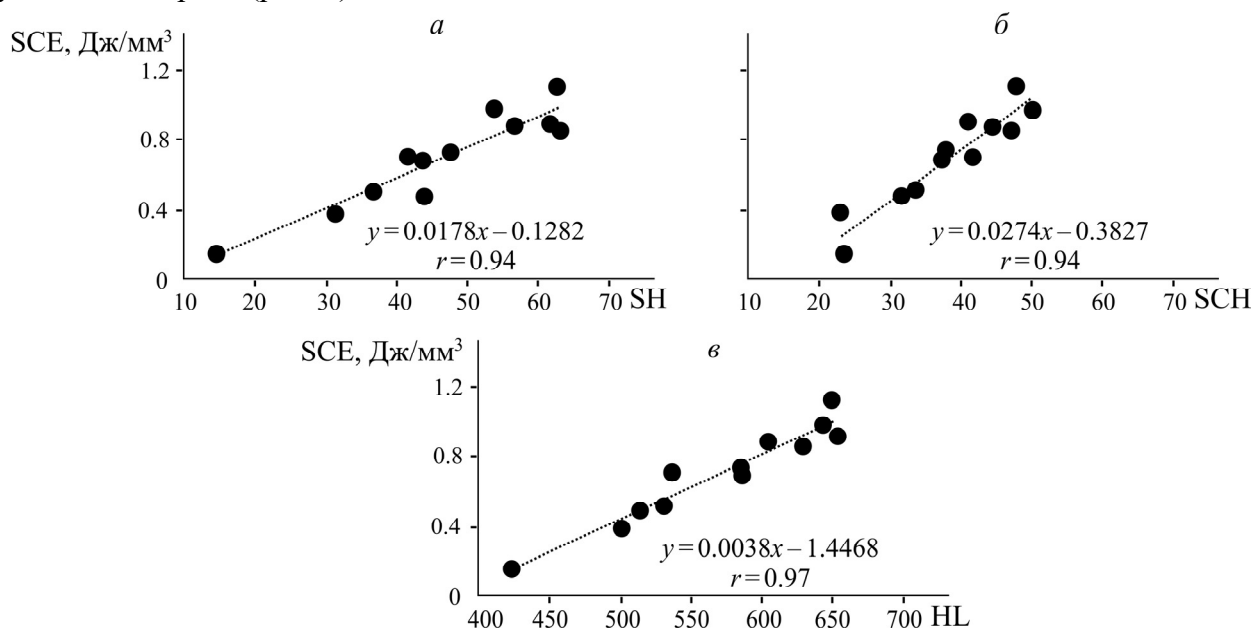


Рис. 5. Соотношения между удельной энергией резания SCE и значениями твердости по Шору (а), Шмидту (б), Либу (в)

Между значениями удельной энергии резания и значениями твердости природного камня, измеренными различными методами, получены соотношения с высоким уровнем корреляции. Наибольшая корреляция ($r=0.97$) получена между значениями HL и SCE. Следовательно, твердость по Либу может использоваться как метод определения твердости и как показатель для оценки удельной энергии резания вместо SH и SCH.

Соотношение между уровнем шума и значениями твердости по Либу, Шору, Шмидту. Один из параметров оценки эффективности обрабатываемости природного камня — уровень шума в процессе резания. Для обеспечения безопасности выполнения работ и снижения вредного воздействия на здоровье людей крайне важно определить свойства породы и предполагаемый уровень шума перед выполнением работ, чтобы предпринять все соответствующие защитные меры.

Методом простой статистической регрессии выполнен анализ соотношений между уровнем шума в процессе резания и значениями поверхностной твердости природного камня (рис. 6). Выявлено, что значения уровня шума имеют линейную зависимость от всех трех видов твердости и наиболее точно прогнозируются с помощью значений твердости по Шмидту ($r=0.86$).

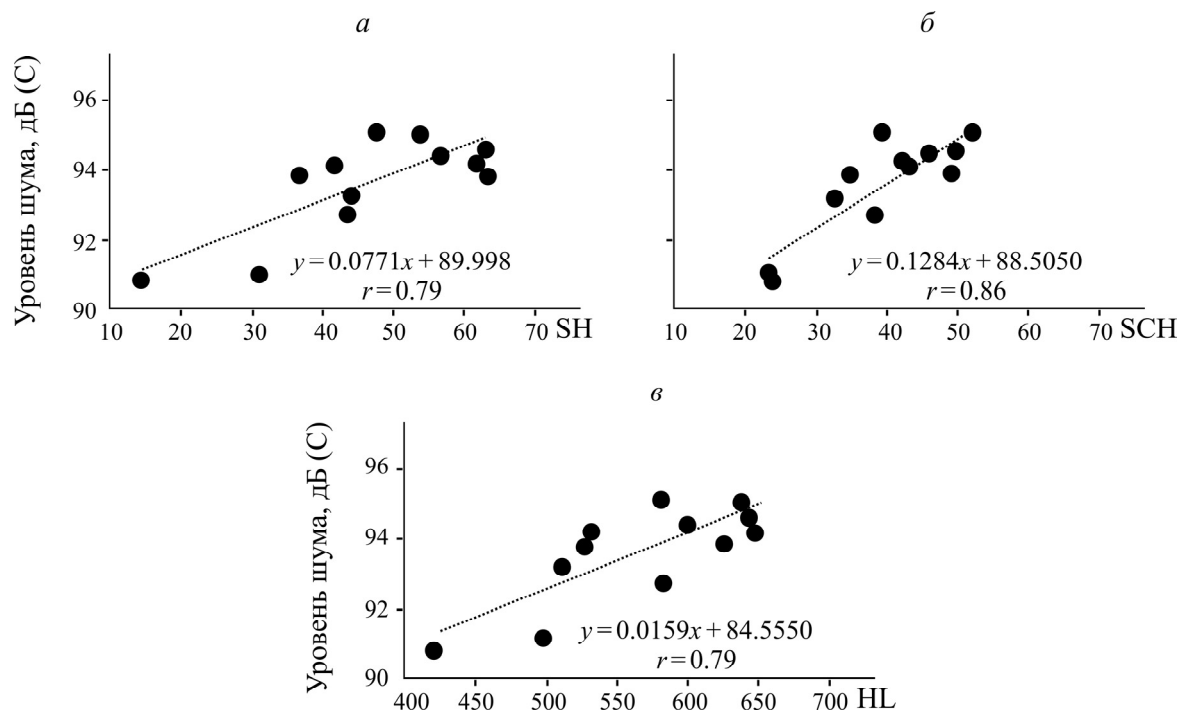


Рис. 6. Соотношения между уровнем шума и значениями твердости по Шору (а), Шмидту (б), Либу (в)

Соотношения между параметрами обрабатываемости природного камня и его физико-механическими свойствами. При помощи программы SPSS 2021 создана матрица соотношений для определения взаимосвязи между тремя различными значениями твердости, физико-механическими свойствами породы, а также значениями удельной энергии и уровнем шума (табл. 5). Выявлено, что значения удельной энергии резания обладают большей корреляцией с физико-механическими свойствами по сравнению со значениями уровня шума. Возможно, это связано с недостаточной чувствительностью шумомера. Предполагается, что значения коэффициентов корреляции увеличатся при использовании более точных данных измерения уровня шума в процессе обработки природного камня.

ТАБЛИЦА 5. Значения коэффициентов корреляции (r)

Параметры обрабатываемости	UVW, г/см ³	V_p , м/с	BAR, см ³ /50 см ²	UCS, МПа	BTS, МПа	I _{SS50} , МПа	SH	SCH	HL
SCE	0.851	0.803	–0.945	0.951	0.932	0.762	0.936	0.944	0.965
NL	0.788	0.528	–0.882	0.837	0.698	0.622	0.785	0.858	0.786

Влияние минералогических свойств на обрабатываемость резанием. Породы бежевой группы занимают наибольшую долю в составе образцов. Они состоят из мелкозернистых минералов (микрит, спарит, кальцит). Образцы не содержат полостей расплава, трещины заполнены вторичными минералами. Следовательно, твердость образцов природного камня бежевой группы является наибольшей по сравнению с другими. Из-за высокой прочности структуры камня его фрагментация в процессе резания является трудоемкой задачей. Удельная энергия резания образцов бежевой группы наибольшая из всех групп. Значения твердости образцов природного камня мраморной группы меньше, чем бежевой из-за крупно-средней зернистости, поэтому удельная энергия резания будет ниже. Группа образцов травертина и известняка обладает наименьшими значениями твердости и наименьшей удельной энергией резания, так как они сформированы из крупнозернистых кальцитовых минералов и содержат полости расплава в отличие от бежевой и мраморной групп.

Анализ методом множественной статистической регрессии. Методом множественной регрессии с двумя независимыми переменными проанализировано большое количество вариантов, модели с наибольшей корреляцией представлены ниже:

Модель	r
$SCE = 0.002 \cdot HL - 0.011 \cdot BAR - 0.344$	0.985
$SCE = 0.002 \cdot HL + 0.012 \cdot SCH - 1.107$	0.984
$NL = 0.012 \cdot UCS + 0.082 \cdot SCH + 89.277$	0.870
$NL = 0.001 \cdot HL - 0.119 \cdot BAR + 96.014$	0.882

Твердость по Либу HL и абразивная стойкость по Беме BAR показывают высокие коэффициенты корреляции при оценке удельной энергии резания и уровня шума. Таким образом, твердость и сопротивляемость истиранию природного камня — важные параметры, влияющие на его обрабатываемость резанием.

ВЫВОДЫ

Определены коэффициенты корреляции между твердостью по Либу, Шору и Шмидту. Твердость по Либу может рассматриваться альтернативной твердости по Шору и Шмидту для карбонатных горных пород.

Между удельной энергией резания и значениями твердости природного камня получены соотношения с высоким уровнем корреляции. Обнаружено, что твердость по Либу позволяет надежно оценивать удельную энергию резания и уровень шума.

Измерение твердости по Либу может быть использовано для экономичного и эффективного прогнозирования обрабатываемости карбонатных пород резанием. Результаты данной работы помогут потенциальному инвестору в выборе технологического оборудования и технологии организации работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bayram F.** Estimation of unit energy from cutting and environment parameters in circular cutting of natural stones, *AKU-J. Sci. Eng.*, 2020, Vol. 20. — P. 340–347.
2. **Ekincioglu G., Güney A., Akbay D., and Altındağ R.** Estimation of hourly slab productions of circular saw cutting machines by artificial neural network (YSA) and regression analysis (RA) based on Marble Surface Hardness, *Proc. of the 9th Int. Marble and Natural Stones Congress and Exhibition of Turkey*, Antalya, 2017.
3. **Siegesmund, S. and Dürrast H.** Physical and mechanical properties of rocks, In: *Stone in architecture, properties, durability*, Siegesmund S., Snethlage R. (eds.) Berlin, 2014. — P. 97–224.
4. **Shalabi F. I., Cording E. J., and Al-Hattamleh O. H.** Estimation of rock engineering properties using hardness tests, *Eng. Geol.*, 2007, Vol. 90. — P. 138–147.
5. **Çelik M. Y., Yeşilkaya L., Ersoy M., and Turgut T.** Investigation of the relationship between grain size and Knoop hardness on carbonate natural stones, *Mining*, 2011, Vol. 50. — P. 29–40.
6. **Bamford W. E., H. Van Duyse, Nieble C., Rummel F., Broch E., Franklin J. A., Atkinson R. H., Tarkoy P. J., and Deere D. U.** Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1978, Vol. 15. — P. 89–97.
7. **Çelik S. F. and Çobanoğlu İ.** Comparative investigation of Shore, Schmidt, and Leeb hardness tests in the characterization of rock materials, *Environ. Earth Sci.*, 2019, Vol. 78. — P. 1–16.
8. **Atkinson R. H.** Hardness test for rock characterization, In: *Comprehensive rock engineering: principles, practice and projects*, Hudson J. A. (ed), Oxford, 1993. — P. 105–147.
9. **Leeb D.** Dynamic hardness testing of metallic materials, *NDT Int.* 12, 1979. — P. 274–278.
10. **Wilhelm K., Viles H., and Burke O.** Low impact surface hardness testing (Equotip) on porous surfaces – advances in methodology with implications for rock weathering and stone deterioration research, *Earth. Surf. Process. Landf.*, 2016, Vol. 41. — P. 1027–1038.
11. **Kompatscher M.** Equotip — rebound hardness testing after D. Leeb, *IMEKO TC5 Conference on hardness measurements theory and application in laboratories and industries*, Washington, 2004.
12. **Ünver B.** A statistical approach for practical determination of sawability of rocks, *Mining.*, 1992, Vol. 31. — P. 17–25.
13. **Büyüksağış İ. S.** Analysis of sawability of marbles with diamond disc block cutter machines, *Osmangazi University, Ph. D. Thesis*, 1998, Eskişehir. — P. 172.
14. **Xu X.** Friction Studies on the process in circular sawing of granites, *Tribol. Lett.*, 1999, Vol. 7. — P. 221–227.
15. **Yılmaz, Güneş N., Göktan M., and Onargan T.** Differences observed in the sawability characteristics of acidic and basic commercial granites, *5th Int. Min. Machinery Symposium and Exhibition of Turkey*, Eskişehir, 2015.
16. **Ucun I., Aslantaş K., Taşgetiren S., and Büyüksağış İ. S.** Fracture path prediction of diamond segment in a marble cutting disc, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2008, Vol. 31. — P. 517–525.
17. **Şengün N., Altındağ R., and Koççaz C. E.** The sawability analysis of some magmatic rocks in Isparta region, *DEÜFMD*, 2009, Vol. 11. — P. 22–31.
18. **Yurdakul M. and Akdaş H.** Prediction of specific cutting energy for large diameter circular saws during natural stone cutting. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2012, Vol. 53. — P. 38–44.
19. **Sengun N. and Altindag R.** Prediction of specific energy of carbonate rock in industrial stones cutting process. *Arab. J. Geosci.*, 2013, Vol. 6. — P. 1183–1190.
20. **Yurdakul M.** Effect of cutting parameters on consumed power in industrial granite cutting process performed with the multi-disc blok cutter, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2015, Vol. 76. — P. 104–111.
21. **Tumaç D.** Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2015, Vol. 75. — P. 159–168.

22. **Sarışık G. and Özkan E.** Effects of natural rock properties on cutting forces, specific energy and specific cutting energy by four-axis machine. Arab. J. Geosci., 2018, Vol. 11. — P. 1–19.
23. **Ekincioglu G. and Altındağ R.** Investigation of the effect of boron carbide-added diamond sockets on cutting performance in granite cutting. Arab. J. Geosci., 2019, Vol. 12. — P. 170.
24. **Ekincioglu G.** Evaluation of the relationships between drillability index properties and rock sawability of various limestones. Süleyman Demirel University, M.S. Thesis, Isparta, 2008. — P. 94.
25. **Şengün N.** The effects of fracture toughness and brittleness of rocks on sawing efficiency with circular discs. Süleyman Demirel University, Ph. D. Thesis, Isparta, 2009. — P. 165.
26. **TS EN 1936:** Natural stone test methods — Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity, Turkish Standards Institution, Ankara, 2010.
27. **TS EN 14579:** Natural stone test methods — Determination of sound speed propagation, Turkish Standards Institution, Ankara, 2006.
28. **TS EN 14157:** Natural stone test methods — Determination of the abrasion resistance, Turkish Standards Institution, Ankara, 2017.
29. **TS EN 1926:** Natural stone test methods — Determination of uniaxial compressive strength, Turkish Standards Institution, Ankara, 2007.
30. **TS EN 12372:** Natural stone test methods — Determination of flexural strength under concentrated load, Turkish Standards Institution, Ankara, 2007.
31. **ISRM:** Rock characterization, testing and monitoring — ISRM Suggested Methods, Brown E.T. (ed), Pergamon Pres, Oxford, 1981.
32. **ISRM:** Suggested method for determining point load strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech., 1985, Vol. 22. — P. 51–60.
33. **ISRM:** Rock characterization, testing and monitoring — ISRM Suggested Methods, Brown E.T. (ed), Pergamon Pres, Oxford, 2007.
34. **Altındağ, R. and Güney A.** ISRM suggested method for determining shore hardness value for rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2006, Vol. 43. — P. 996–997.
35. **Şengün N., Altındağ R., and Demirdağ S.** Investigation into variations of saw rotation and noise level in cutting by circular saw, Pamukkale Univ. Muh. Bilim. Derg., 2013, Vol. 19. — P. 121–126.

*Поступила в редакцию 26/III 2022
После доработки 12/II 2023
Принята к публикации 18/V 2023*