

Исследование процессов обработки

УДК 679.8

В. И. Сидорко, В. В. Пегловский, В. Н. Ляхов (г. Киев)

Влияние содержания оксида кремния в природных камнях на их прочностные свойства, производительность алмазного шлифования и потребляемую мощность

Исследовано влияние содержания оксида кремния в природных камнях на их твердость по Моосу, предел прочности при одноосном сжатии, микротвердость, производительность алмазного шлифования и потребляемую при шлифовании мощность. Показано, что увеличение содержания этого компонента в составе природных камней оказывает влияние на прочностные свойства и потребляемую при обработке мощность, а также существенно влияет на производительность алмазного шлифования.

***Ключевые слова:** оксид кремния, природные камни, алмазное шлифование, прочностные свойства, твердость, прочность при сжатии, производительность, потребляемая мощность.*

Введение. В настоящее время в производственно-технических и художественно-декоративных целях используют около 150 видов природных камней, в том числе для изготовления декоративно-художественных изделий [1] — около 60 наименований. При механической обработке таких камней некоторые из них, например, мраморные ониксы и мраморы можно обрабатывать обычными лезвийными инструментами (быстрорежущими и твердосплавными), которые применяют для металлов и их сплавов, а другие, например, яшма, кварц, являются труднообрабатываемыми даже при использовании алмазно-абразивного инструмента.

При исследовании трудоемкости изготовления изделий из природного камня, являющейся нормативным показателем качества таких изделий [2], обычно определяют трудоемкость обработки одних камней относительно других, принимаемых за эталонные [3], или объединяют природные камни в группы по обрабатываемости [4] в зависимости от физико-механических свойств.

В настоящее время точно не установлено, какие именно факторы приводят к формированию у природных камней тех или иных физико-механических свойств, хотя известно, что определенную роль в этом играют

© В. И. СИДОРКО, В. В. ПЕГЛОВСКИЙ, В. Н. ЛЯХОВ, 2008

условия образования природного камня (температура, давление, время, внешняя среда), вид камня (минерал или горная порода), вид минерала (монокристалл или поликристалл), минералогический и химический состав камня и некоторые другие.

Поэтому исследование влияния компонентов химического состава природных камней на их физико-механические свойства, производительность и потребляемую мощность алмазного шлифования является актуальной задачей для повышения эффективности камнеобрабатывающего производства.

Известно, что в составе природных камней присутствуют две основные группы химических компонентов — оксиды и карбонаты. Среди оксидов наиболее широко распространенными в составе природных камней, безусловно, являются оксиды кремния (SiO_2), а также алюминия (Al_2O_3), железа (Fe_2O_3), кальция (CaO) и магния (MgO).

Необходимо отметить, что в составе природных камней присутствуют и другие оксиды: титана (TiO_2), марганца (MnO), калия (K_2O), натрия (Na_2O), фосфора (P_2O_5), меди (CuO) и т. д. Однако некоторые из них, например, оксиды титана, марганца и фосфора, содержатся в незначительных количествах, как правило, до 1 %. Другие присутствуют только в редких видах камня, например, оксид меди — в малахите, а оксиды калия или натрия — в камнях, имеющих ограниченное использование в производстве декоративно-художественных изделий, например, полевых шпатах.

Данные о влиянии химического состава некоторых силикатных систем, например, стекол различных марок на эффективность их финишной алмазно-абразивной обработки приведены в [5, 6]. Можно предположить, что на рассматриваемые свойства природных камней также оказывают влияние количество и процентное содержание химических соединений в их составе.

При исследовании процессов финишной обработки некоторых неметаллических материалов используют понятие обрабатываемости материалов — способности сопротивляться внешнему механическому воздействию, которая может быть оценена коэффициентом относительной обрабатываемости [5, 6]. Материалом, относительно которого определяется обрабатываемость исследуемых материалов, служит оптическое стекло марки К8, а показателем обрабатываемости является производительность шлифования.

Природные камни по обрабатываемости сравнивают с определенными видами камней [3], как правило, с технической (Калканской) яшмой, имеющей относительно постоянное содержание оксида кремния, либо с мрамором (Колелгинским), в химическом составе которого оксид кремния практически отсутствует.

На прочностные свойства природных камней, принимаемых за эталонные [3, 4], и оптического стекла марки К8 [5, 6] очевидно влияет содержание оксида кремния в их составе (табл. 1).

В известных попытках классифицировать природные горные породы по обрабатываемости [4] их также объединяют в группы в зависимости от прочностных свойств: твердости по Моосу, микротвердости (твердости при склерометрии) и пределу прочности при сжатии. Это распределение, по которому наиболее труднообрабатываемым камнем считается кварцит, не включает значительного количества видов природных камней, применяемых для изготовления декоративно-художественных и производственно-технических изделий. Например, кварц и камни халцедоновой группы имеют более высокие

значения твердости по Моосу, чем кварциты, а нефриты и жадеиты — более высокие по сравнению с кварцитом значения предела прочности при сжатии.

Таблица 1. Содержание оксида кремния в эталонных материалах и их прочностные свойства

| Эталонный материал | Содержание SiO ₂ , % (по массе) | T_M , отн. ед. | $R_{сж}$, МПа | H , ГПа |
|--------------------|--|------------------|----------------|-----------|
| Коелгинский мрамор | 0,2 | 4,0 | 80 | 1,8 |
| Стекло К8 | 69,1 | 5,0—5,5 | 31—65 | 5,85 |
| Яшма техническая | 79,8 | 6,5 | 170 | 8,2 |
| Кварц | 97,3 | 7,0 | Более 300 | 11,0 |

В данной работе рассмотрено влияние процентного содержания оксида кремния в составе полудрагоценных и декоративных природных камней [7] на их основные прочностные свойства: твердость по Моосу T_M , предел прочности при сжатии $R_{сж}$ и микротвердость H , а также производительность Q и мощность N алмазного шлифования.

Методика исследований. Предварительные данные о влиянии содержания оксида кремния на прочностные свойства, а именно, твердость по Моосу, были получены в [8]. Поэтому, исходя из имеющегося опыта изготовления изделий из природного камня [9], для дальнейших исследований были отобраны 11 видов природных камней, отличающихся по обрабатываемости: мраморный оникс, мрамор, офиокальцит, серпентинит, лабрадорит, гранит, амазонит, яшма, кварцит и кварц.

Выбранные для исследований виды камней ранжированы в зависимости от содержания оксида кремния, причем содержание указанного соединения подбирали по возможности через равные интервалы (ориентировочно 10 %): 0, 10, 20, ..., 100 % (табл. 2), а данные о прочностных свойствах природных камней получены из [3, 4, 10—15].

Для сопоставления имеющихся в литературе и полученных авторами данных о свойствах природных камней их исследовали по методам, представленным в [16], для испытаний на сжатие использовали оборудование в соответствии с [17], на микротвердость — прибор ПМТ-3. Это дало возможность получить значения исследуемых величин в сопоставимых единицах измерения.

Из анализа данных [3, 4, 10—15] можно предположить, что производительность и потребляемая мощность шлифования выбранных природных камней алмазным инструментом также зависит от содержания в их составе оксида кремния.

Для проверки этого предположения исследовали производительность алмазного шлифования природных камней с различным содержанием оксида кремния. Образцы природных камней (см. табл. 2) изготавливали размерами 100×100×(20—25) мм.

Технологический процесс изготовления образцов для экспериментальных исследований представлен в табл. 3.

Для определения производительности шлифования использовали шлифовально-полировальный станок мод. ЗПП-320, реализующий технологическую схему притира, широко применяемый в камнеобрабатывающем и опти-

ческом производстве, и алмазный круг формы 6A2, диаметром 150 мм, специальной конфигурации с алмазоносным слоем AC400 1000/800 150 M1-10, который устанавливали на одной из рабочих позиций станка при помощи специальной оправки для крепления инструмента, обеспечивающей возможность его быстрой установки и съема. Технологические режимы обработки назначали в соответствии с действующими методами испытания природных камней на истираемость [16], предусматривающими проведение экспериментальных исследований при обеспечении удельного давления 60 кПа и одинакового для всех образцов пути трения равного 1000 м.

Таблица 2. Содержание, % (по массе), оксида кремния и других составляющих в природных камнях

| Материал, месторождение или торговая марка | Содержание SiO ₂ | | Оксиды Al и Fe | Прочие оксиды, карбонаты и др. |
|--|-----------------------------|-------------|----------------|--------------------------------|
| | предполагаемое | фактическое | | |
| Мраморный оникс (Карлюкский, Казахстан) | 0 | 0,20 | 56,00 | 43,80 |
| Мрамор (Кибиккордонский, Россия) | 10 | 8,10 | 50,80 | 41,10 |
| Офиокальцит (Россия) | 20 | 18,40 | 50,00 | 31,60 |
| Мрамор (TISD, Индия) | 30 | 28,70 | 51,70 | 19,60 |
| Серпентинит (Чусовской, Россия) | 40 | 43,90 | 44,90 | 11,20 |
| Лабрадорит (Головинский, Украина) | 50 | 53,60 | 41,80 | 4,60 |
| Амазонит (Россия) | 60 | 67,20 | 22,00 | 10,80 |
| Гранит (Софиевский, Украина) | 70 | 71,36 | 19,98 | 8,66 |
| Яшма техническая (Калканская, Россия) | 80 | 79,80 | 15,70 | 4,50 |
| Кварцит (Шокшинский, Россия) | 90 | 93,80 | 5,10 | 1,10 |
| Кварц (Украина) | 100 | 97,30 | 2,70 | 0 |

Таблица 3. Основные технологические операции при изготовлении образцов из природного камня для проведения экспериментальных исследований

| Операция | Оборудование | Инструмент |
|-------------|-------------------------------------|---|
| Резка блока | Порезной станок мод. БМ-1 | Круг отрезной 1A1R 2726-0601 AC32 315/250 50 M2-01 [18] |
| Шлифование | Плоскошлифовальный станок мод. ЗБ71 | Круг прямого профиля 1A1 27 20-0138 AC32 100/80 50 B2-01 [19] |

Остальные технологические параметры при определении производительности шлифования приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные технологические параметры процесса шлифования

| Параметр | Единица измерения | Значение |
|----------------------------|---------------------|------------------------------|
| Частота вращения шпинделя | об/мин | 97 |
| Усилие прижима инструмента | Н | 600 |
| Несимметрия штриха | мм | 30 |
| Расход СОЖ (воды) | м ³ /мин | (3,33—6,67)·10 ⁻⁶ |
| Потребляемая мощность | кВт | 1,8 |

Характеристики алмазного инструмента, а именно, прочность и концентрация алмазов, их зернистость, а также применение хорошо зарекомендовавшей себя для обработки природных камней связки М1-10 обеспечивали интенсивный съем материала.

Время шлифования, определенное из условия прохождения образцом установленного пути трения с учетом его расположения относительно оси и угловой скорости вращения инструмента, составляло 55 мин.

Исследуемым параметром процесса шлифования был объемный износ образцов, который определяли из выражения $\Delta Q = \Delta m / \rho_0$, где ΔQ , Δm — соответственно объемный и массовый износ образцов; ρ_0 — средняя плотность исследуемого образца.

Массовый износ и плотность определяли в соответствии с [16] при стабилизации влажности исследуемых образцов, обеспечиваемой их высушиванием после обработки в течение одного часа при температуре 105 ± 5 °С и остывании до комнатной температуры.

При исследовании влияния содержания оксида кремния на потребляемую при шлифовании мощность N были использованы данные ранее проведенных исследований [20], в которых при определении мощности шлифования применяли специальную экспериментальную установку [21].

На данной установке в образцах (форма, размеры и процесс изготовления приведены выше) выполняли сферические выборки высотой 5 мм и диаметром 55 мм с помощью алмазного круга с двусторонним коническим профилем [22] вида 1ЕЕ1 2727-0006 (диаметр $D = 125$ мм, ширина рабочей части $h = 6$ мм, высота алмазосодержащего слоя $b = 3$ мм, угол при вершине $\alpha = 30^\circ$) с алмазосодержащим слоем АС32 315/250 50 М2-01.

При определении потребляемой мощности выдерживали технологические параметры обработки (скорости вращения инструмента и поворотного стола), которые выбирали исходя из обеспечения максимальной производительности с учетом параметров используемого инструмента и принятых режимов его работы (скорости шлифования равной 15—20 м/с).

Результаты. На рис. 1 приведены аппроксимированные линейными функциями вида $Y = kX + b$, с использованием метода наименьших квадратов и применением программного пакета “Mathcad 2000 Pro” [23], зависимости твердости по Моосу, предела прочности при сжатии и микротвердости от содержания в химическом составе природных камней оксида кремния. Для построения зависимостей использованы данные табл. 2.

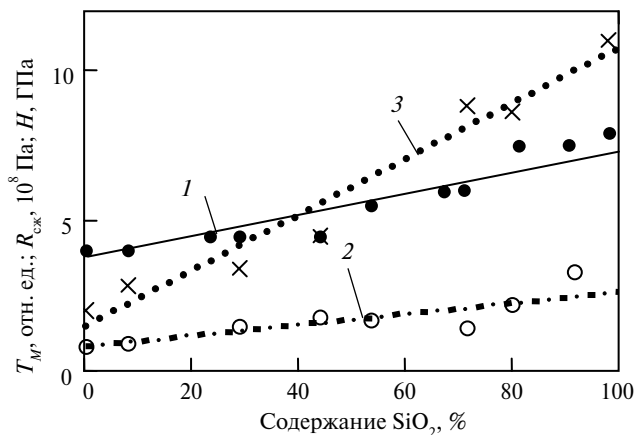


Рис. 1. Зависимость прочностных свойств природных камней от содержания в их химическом составе оксида кремния: твердости по Моосу (1), предела прочности при сжатии (2), микротвердости (3).

Видно, что с увеличением содержания оксида кремния в химическом составе исследуемых видов природного камня твердость по Моосу, предел прочности при сжатии и микротвердость возрастают.

Данные о коэффициентах уравнений регрессий k и b и средних ошибках аппроксимации Δ для указанных выше зависимостей (см. рис. 1) сведены в табл. 5.

Таблица 5. Коэффициенты регрессии и средние ошибки аппроксимации зависимостей твердости по Моосу, предела прочности при сжатии и микротвердости от содержания SiO_2

| Зависимость (см. рис. 1) | k | b | Δ , % |
|--------------------------|-------|-------|--------------|
| 1 | 0,031 | 3,730 | 3,2 |
| 2 | 0,018 | 0,803 | 12,3 |
| 3 | 0,093 | 1,490 | 15,1 |

Рассматривая средние значения ошибок для зависимостей исследуемых величин от содержания оксида кремния, можно сделать вывод, что линейные функции с достаточной (до 20 %) точностью описывают эти зависимости, а также что наибольшее влияние изменение содержания оксида кремния оказывает на микротвердость, наименьшее — на предел прочности при сжатии.

Если зависимости основных прочностных свойств природного камня от содержания оксида кремния, в основном, можно аппроксимировать линейными функциями (см. рис. 1), то объемную производительность алмазного шлифования для исследованных видов природных камней нельзя представить аналогичным образом.

Зависимость производительности алмазного шлифования от наличия в составе природных камней оксида кремния представлена на рис. 2. Камни, содержащие в своем составе до 50 % оксида кремния (см. рис. 2, а) — это камни средней твердости, а содержащие указанный компонент свыше этого значения (см. рис. 2, б) — твердые [4].

Аппроксимировать зависимости производительности алмазного шлифования для камней средней твердости и твердых можно общепринятыми при

изучении процессов шлифования степенными функциями вида $Y = \kappa X^C + b$ с допустимой (до 20 %) точностью.

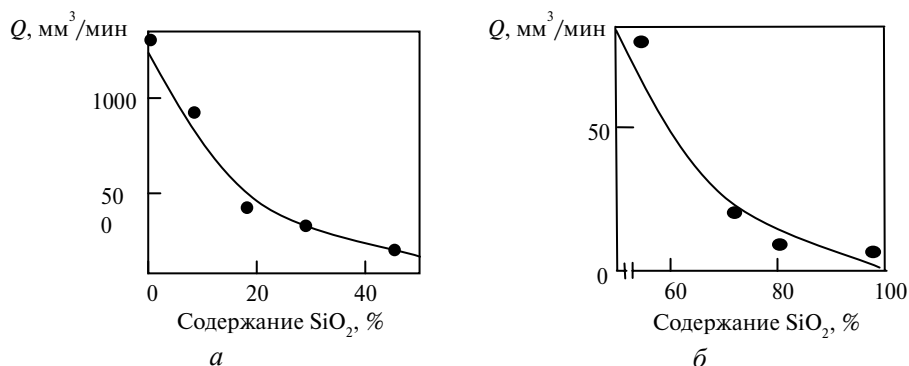


Рис. 2. Зависимость производительности алмазного шлифования камней средней твердости (а) и твердых (б) от содержания в их химическом составе оксида кремния.

На рис. 2 видно, что тенденция снижения производительности алмазного шлифования с увеличением содержания в составе природных камней оксида кремния сохраняется для всего интервала изменения его содержания. Если за эталон обрабатываемости природного камня принять обрабатываемость мраморного оникса, практически не содержащего в своем составе оксида кремния и являющегося в силу этого наиболее легко обрабатываемым материалом из всех рассматриваемых, то обрабатываемость наиболее труднообрабатываемого из исследованных камней — кварца, с почти 100 %-ным содержанием указанного компонента, — ниже приблизительно в 200 раз.

В табл. 6 приведены данные о коэффициентах регрессий и средней точности нелинейной аппроксимации для камней средней твердости и твердых камней.

Таблица 6. Коэффициенты регрессии и средние ошибки аппроксимации зависимости производительности шлифования от содержания SiO_2

| Зависимость (см. рис. 2). | κ | C | b | Δ , % |
|---------------------------|----------------------|--------|--------------------|--------------|
| <i>a</i> | -308,403 | 0,383 | $1,487 \cdot 10^3$ | 15,4 |
| <i>б</i> | $1,31 \cdot 10^{11}$ | -5,325 | 1,803 | 13,3 |

Зависимость потребляемой при обработке выбранных видов природных камней мощности от содержания в их составе оксида кремния (рис. 3) может быть аппроксимирована так же, как и зависимость прочностных свойств — линейной функцией. Для данной зависимости коэффициенты регрессии $\kappa = 0,0072$, $b = 1,044$, а средняя точность аппроксимации $\Delta = 4,4$ %.

Ввиду широкого разнообразия природных камней, используемых в производстве декоративно-художественных и производственно-технических изделий, необходимо дальнейшее изучения закономерностей процесса алмазного шлифования других видов полудрагоценных и декоративных камней. При этом желательно исследовать близкие по обрабатываемости или содержащие одинаковые компоненты химического состава материалы.

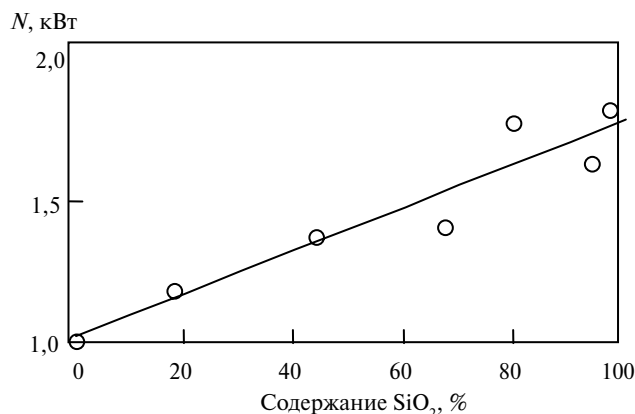


Рис. 3. Зависимость потребляемой при шлифовании природных камней мощности от содержания в их химическом составе оксида кремния.

Выводы

Установлено, что увеличение содержания оксида кремния в составе природных камней приводит к возрастанию основных прочностных свойств: твердости по Моосу, предела прочности при сжатии и микротвердости. Наибольшее влияние оксид кремния оказывает на микротвердость, наименьшее — на предел прочности при сжатии.

Увеличение содержания оксида кремния в составе различных природных камней приводит к значительному (более чем в 200 раз) снижению производительности алмазного шлифования и к увеличению в 1,5—2,0 раза потребляемой при шлифовании мощности.

Влияние содержания этого компонента химического состава природных камней необходимо учитывать при выборе характеристик камнеобрабатывающего инструмента, назначении технологических режимов шлифования, определении технологических параметров процесса изготовления изделий из камня.

1. ТУ У 26.7—23504418—001: 2007. Изделия камнерезные. — Введ. 01.05.07.
2. ДСТУ Б В.2.7-16—95. Строительные материалы. Материалы стеновые каменные. Номенклатура показаний качества. — Введ. 01.07.95.
3. Синкенес Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней / Пер. с англ. Л. В. Булгака. — М.: Мир, 1989. — 422 с.
4. Добыча и обработка природного камня: Справ. / Под. ред. А. Г. Смирнова. — М.: Недра, 1990. — 445 с.
5. Рогов В. В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей. — Киев: Наук. думка, 1985. — 264 с.
6. Филатов Ю. Д. Научные основы прецизионного полирования поверхностей деталей из кремнеземсодержащих материалов: Дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1996. — 414 с.
7. Постановление Кабинета Министров Украины “Про загальну класифікацію та оцінку вартості природного камення” от 27 июля 1994 года № 512.
8. Сидорко В. И., Пегловский В. В., Ляхов В. Н., Поталыко Е. М. Изучение влияния минералогических составляющих природного камня на его прочностные свойства // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технологии его изготовления и применения. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2007. — Вып. 10. — С. 482—487.
9. Сидорко В. И., Ляхов В. Н., Пегловский В. В. Художественные изделия из природного камня “Алкон-сервиса” // Инструментальный світ. — 2002. — № 1 (13). — С. 21, 48.
10. Григорович М. Е. Декоративно-облицовочные камни // Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней / Под ред. Е. А. Киевленко. — М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1977. — Вып. 12. — 90 с.

11. Григорович М. Б., В. С. Шальных. Яшмы и роговики // Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней / Под. ред. Е. А. Киевленко. — М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1978. — Вып. 23. — 64 с.
12. Минералы и самоцветы: знатокам, любителям и коллекционерам всех направлений о минералах и самоцветах: Справ. / Пер. с итал. Н. П. Григорьева. — М.: Астрель, 2006. — 320 с.
13. Баранов П. Н. Геммология самоцветов. — Днепропетровск: Металл, 2002. — 208 с.
14. Корнилов Н. И., Солодова Ю. П. Горное дело. Ювелирные камни. — М.: Недра, 1983. — 239 с.
15. Митрофанов Г. К., Шпанов И. А. Облицовочные и поделочные камни СССР. ГКГСА Госстроя СССР. — М.: Недра, 1970. — 200 с.
16. ГОСТ 30629—99. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. — Введ. 01.01.01.
17. ГОСТ 28840—90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические условия. — Введ. 01.01.93.
18. ГОСТ 10110—87. Круги алмазные отрезные формы 1А1R. Основные размеры. — Введ. 01.01.87.
19. ГОСТ 16167—90. Круги алмазные шлифовальные плоские прямого профиля формы 1А1. Основные размеры. — Введ. 01.07.91.
20. Исследование основных закономерностей процесса алмазной обработки цветных камней с целью установления оптимальных режимов обработки: (Отчет о НИР 1114) / ИСМ АН УССР; Руководители темы: В. А. Александров, Е. И. Бобровский, В. Н. Ляхов. — № ГР 73055305; Инв. № 2105. — Киев, 1974. — 74 с.
21. А. с. 334083 СССР, МКИ В 28 d 1/04, В 26 d 5/22. Машина для обработки твердых и хрупких неметаллических материалов / Г. М. Водяник, Э. В. Рылеев, Е. И. Бобровский и др. — Заяв. 20.04.70; Опубл. 30.03.1980, Бюл. № 12.
22. ГОСТ 16179—91. Круги алмазные шлифовальные плоские с двусторонним коническим профилем форм 1ЕЕ1 и 14ЕЕ1. Основные размеры. — Введ. 01.01.93.
23. Кудрявцев В. М. Mathcad 2000 Pro. — М.: ДМК, 2001. — 571 с.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 12.10.07