



ЛАЗЕРНОЕ БУРЕНИЕ ТОНКИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

В КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛАХ

М.Васильев, к.ф.-м.н., В.Журба, В.Митькин, д.т.н.,
В.Романов, А.Щепкин, НПП "ВОЛО", Санкт-Петербург

Механизмы лазерного разрушения пород зависят от температуры нагрева. В процессе разрушения, как правило, участвуют сразу несколько механизмов, причем какой из них преобладает – зависит от материала. На первый взгляд, ввод в процедуру лазерного бурения пассивных циклов охлаждения и механического измельчения материала снижает производительность процесса бурения. Но это справедливо лишь при нагреве до температур, превышающих температуру кипения материала. При нагреве до меньших значений температуры ведущую роль в механизме разрушения начинает играть ослабленный слой.

В последние двадцать лет наблюдается резкий скачок роста мощности излучения твердотельных лазеров. Это связано с появлением и развитием компактных лазеров новой архитектуры (лазеров с диодной накачкой, диодных и волоконных лазеров). Относительная дешевизна излучателей с мощностью свыше киловатта обеспечила их коммерческую доступность для исследователей широкого профиля. Мощное лазерное излучение стало применяться для резки и бурения толстых и объемных материалов (бетон, природные камни и т.д.) [1–5].

Например, в гражданском строительстве [1] применение лазерных технологий, свободных от шума и вибраций, наиболее эффективно в сейсмических районах для бурения отверстий в существующих бетонных зданиях. Там их используют для укрепления с помощью стальных стяжек или подобных деталей аварийных домов, а также при реставрации старинных зданий и их элементов [5]. Пригодна эта технология и в задачах предотвращения обвалов [1] при бурении отверстий

в опасных отвесных участках горной породы для размещения в них взрывчатых веществ и разрушения взрывом.

В атомной отрасли [2] мощное лазерное излучение используют для дезактивации выведенных из эксплуатации бетонных ядерных сооружений. В таком случае пользователей привлекает низкое пылевыведение, сопровождающее процесс лазерного снятия загрязненного поверхностного слоя и резку бетона. Важную роль играет дистанционное управление процессом, то есть удаленное размещение оборудования от объекта. Волоконно-оптические средства доставки лазерного излучения в зону обработки позволяют успешно применить лазерные технологии для бурения тонких диагностических отверстий в многометровых бетонных стенах могильников с захоронениями радиоактивных веществ [5].

В нефтегазовой отрасли [3] мощное лазерное излучение используется для реанимации заброшенных скважин и повышения эффективности вскрытия существующих скважин. Для этого



выполняют перфорацию обсадных труб и сквозь отверстия бурят скважины в окружающей породе (цементированном агрегате, песчанике, известняке, сланце и др.).

Выбор оптимального и наиболее эффективного режима лазерной термообработки материалов зависит от конкретной цели. Необходимо четко представлять физические процессы и механизмы разрушения, происходящие в материалах в процессе лазерного воздействия на них. Механизмы лазерного разрушения пород зависят как от нагрева материала из-за поглощения излучения, так и от градиента температуры в материале, вызванного процессом теплопроводности. Поэтому их условно можно разделить на низкотемпературные и высокотемпературные механизмы разрушения. Условия для низкотемпературного механизма реализуются в области температур упруго-хрупкого состояния материала на стадиях нагрева и охлаждения. Так, при высокоскоростном нагреве поверхности образца в глубине тонкого приповерхностного слоя неизбежно возникает градиент температур. За счет него в слое появляются температурные касательные напряжения растяжения. В случае превышения предела прочности материала происходит локальное разрушение в виде шелушения и термического скола. К шелушению поверхности приводит также изменение давления от резкого расширения свободной воды (при температуре около 200°C вода находится в пористой структуре приповерхностного слоя бетона) и частично выделяемой основной части химически связанной воды, входящей в состав цемента (в области температур 800–900°C). При охлаждении нагретой поверхности под действием градиента температуры уже на ней самой возникают растягивающие напряжения. Они также могут превысить предел прочности материала и разрушить его, образуя на поверхности трещины. Высокотемпературный механизм разрушения реализуется в области температур размягчения материала в виде плавления, испарения или термического разложения.

Таким образом, при воздействии мощного лазерного излучения на породы их разрушение происходит как за счет скалывания приповерхностного слоя материала из-за перепада температур и флуктуаций внутреннего давления, так и за счет плавления, испарения или термического разложения материала в области воздействия лазерного пятна. Для повышения эффективности лазерного разрушения используют струю газа высокого давления для выноса расплава

из зоны обработки, а для быстрого охлаждения расплава и растрескивания затвердевшей остеклованной массы (шлака) в струю газа впрыскивают жидкость. Действия дополняют механическим дроблением и удалением шлака, введением в зону обработки порошков восстановителей для уменьшения температуры плавления кремнезема и т.д. В процессе разрушения, как правило, участвуют сразу несколько механизмов, причем преобладающее действие одного из них зависит от состава наполнителей материала. Так, в разрушении бетона, содержащего агрегаты из кварцита или базальта, мощным лазерным излучением превалирует эффект плавления над эффектами внутреннего давления. В то же время в бетоне с агрегатами из известняка разрушение носит взрывной характер, сопровождающийся выбросом кусков бетона без проявления следов плавления обработанной поверхности [2]. Для каждой породы характерно свое значение удельной энергии разрушения [3, 5].

ЭФФЕКТ ТЕПЛООВОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрим результаты лазерного бурения тонких глубоких отверстий в кремнеземсодержащих материалах (на примере бетона). При этом сделаем акцент на проявлении низкотемпературных механизмов разрушения при бурении пород, особенно на механизме теплового ослабления материала. Механизм теплового разупрочнения кремнеземсодержащих материалов, а к ним относятся практически все горные породы и искусственные строительные материалы, подробно описан в работе [6]. Обратимое превращение в кремнеземе низкотемпературного β -кварца в высокотемпературный α -кварц при переходе через температуру 573°C приводит к разупрочнению [7]. Это превращение относится к типу превращений смещения, происходит без разрыва связей и сопровождается увеличением объема примерно на 0,86%, что свидетельствует о незначительных изменениях в структуре. Однако незначительные изменения структуры кремнезема приводят к заметным изменениям различных физических свойств материала в интервале температур превращения. Поэтому при температуре, соответствующей температуре перехода, внутри кристалла возникают напряжения большой величины [7]. Превращению при нагреве β -кварца в α -кварц соответствует медленное изменение физических свойств в некотором температурном интервале. Это связано с постепенным увеличением доли α -кварца в β -кварце

вплоть до полного его замещения в точке перехода (при $\sim 573^\circ\text{C}$). Поэтому наблюдаемое при нагреве увеличение внутренних напряжений в точке перехода не вызывает растрескивания кристаллов. Этот факт экспериментально зафиксирован [7] при нагреве образцов размером 0,3–5 мм со скоростью до 100 град/мин. Обратному же при охлаждении превращению α -кварца в β -кварц соответствует резкое изменение физических свойств в точке перехода. А это уже приводит к растрескиванию кристаллов из-за резкого уменьшения их объема, вызывающего всплеск величины внутренних напряжений выше предела прочности. Заметим, что из-за высоких скоростей нагрева при лазерном бурении вероятно возникновение растрескивания и в процессе нагрева. Однако это требует экспериментального подтверждения. В работе [6] разупрочнение было продемонстрировано на примере бетона, кирпича, гранита и цементно-песчаной смеси как при омическом нагреве, так и при лазерном нагреве тонких и объемных деталей с последующим их охлаждением. Особенно ярко эффект такого разупрочнения был продемонстрирован в следующем эксперименте. Излучение волоконного лазера мощностью 100 Вт падало на плитку бетона толщиной 30 мм (диаметр пятна воздействия на внешней поверхности образца 10 мм). С тыльной стороны пластины по оси лазерного пучка была закреплена термопара для измерения температуры поверхности образца. Когда температура достигала 700°C , облучение прекращали и охлаждали образец естественным образом на воздухе. В момент выключения излучения температура на внешней поверхности в пятне воздействия согласно расчетам для данной скорости нагрева (200 град/с) достигала величины начала плавления материала. Это заметно при появлении

на внешней поверхности образца оплавленной зоны диаметром 8 мм (рис.1а). По мере охлаждения определяли твердость материала на тыльной поверхности образца, процарапывая ее позади оплавленного фронтального пятна. Только после остывания до температур ниже -130°C было зафиксировано разупрочнение материала, что позволило деревянной палочкой выскоблить материал в пятне диаметром, примерно равным 8 мм (рис.1б). Полученный результат показал, что и при лазерном облучении с присущими ему высокими скоростями нагрева разупрочнение кремнеземсодержащих материалов происходит также на стадии их охлаждения. Следовательно, для бурения кремнеземсодержащих материалов не обязательно использовать локальный нагрев до высоких температур плавления и испарения. Достаточно нагреть обрабатываемый материал до температур, немного превышающих 600°C , а после – охладить его для ослабления структуры, затем механически измельчить и удалить из канала струей воздуха продукты разрушения.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ БУРЕНИЕ

Эксперименты по бурению глубоких отверстий начинались с исследования высокотемпературного режима разрушения. При таком методе бурения представляет собой этапы лазерного нагрева локальной площади материала до температуры плавления, последующего испарения и удаления с ее поверхности продуктов разрушения, например

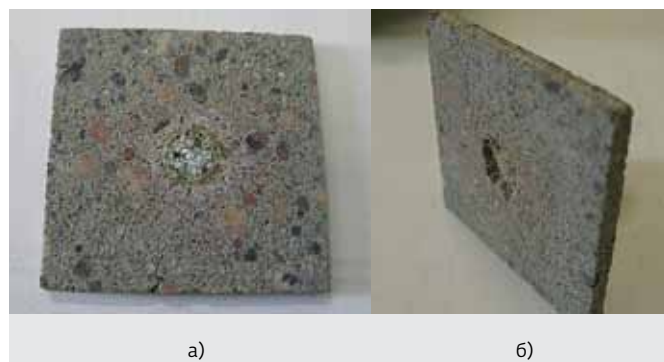


Рис.1. Оплавленная зона бетона: а) входная поверхность; б) тыльная поверхность с зоной выскобленного ослабленного материала (толщина образца 30 мм)

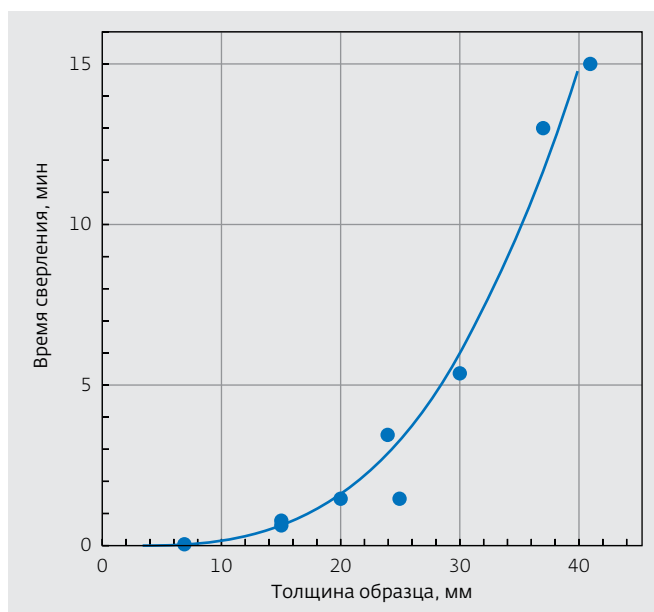


Рис.2. Зависимость скорости обработки бетона в режиме непрерывного облучения от толщины образца

воздушной струей. Следующие слои последовательно нагреваются и также претерпевают плавление и испарение. Граница теплового воздействия лазерного излучения в результате поглощения перемещается вглубь материала вдоль оси пучка, и в результате теплопроводности, – в стороны от контура лазерного пятна.

Объектами наших исследований в экспериментах служили образцы из гранита и бетона, а в качестве первоначального лазерного источника – 120-Вт волоконный лазер. Излучение после коллиматора фокусировалось длиннофокусной ($F=375$ мм) линзой. Продольное перемещение образца относительно линзы в пределах расстояний от нее 200–330 мм позволяло менять плотность мощности излучения в зоне его воздействия. В область обработки с помощью тонкой трубки под минимально возможным углом к оси излучения подавали сжатый воздух под давлением 1,8 атм. На рис.2 приведена зависимость времени образования сквозных отверстий в бетоне от толщины образца при использовании непрерывного режима облучения. При выбранной геометрии эксперимента диаметр отверстия на входной поверхности образца составлял ~2 мм, а на выходной – ~1 мм.

При использовании фокусирующей линзы для доставки излучения в зону обработки в объемном образце формируется отверстие, глубина которого соизмерима с длиной перетяжки сфокусированного лазерного пучка. Длина этой фокальной перетяжки и определяет величину предельной глубины бурения, ограничивая достижение глубоких отверстий в монолитных породах. Поэтому для преодоления этого фактора необходимо последовательно перемещать плоскость с необходимой плотностью излучения вдоль оси формируемого лазерного канала. Продольное перемещение такой плоскости возможно только при использовании волоконно-оптических средств доставки лазерного излучения в зону обработки [4]. Если режим облучения одноточечный, то для обеспечения такого продвижения диаметр формируемого отверстия должен превышать диаметр волоконно-оптического кабеля. При этом вынужденно увеличивается мощность излучения. Размер пятна засветки на материале определяет диаметр формируемого отверстия. В этом случае расстояние между торцом излучающего волокна и плоскостью материала регулирует размер этого пятна. Расстояние необходимо поддерживать постоянным по мере углубления отверстия. Дальнейшие эксперименты мы проводили с лазерами повышенной мощности излучения, совмещенными

с волоконно-оптическими средствами доставки лазерного излучения в зону бурения. В качестве средства использовали магистральное кварц-кварцевое оптическое волокно диаметром 600 мкм, в которое можно было эффективно ввести излучение и волоконного, и твердотельного лазера. При использовании твердотельного лазера ЛТИ-500 мощность излучения на выходе волокна составляла 360 Вт.

Первоначальная конструкция головной рабочей части бура представляла собой систему из двух тесно прижатых друг к другу трубок диаметром 2 мм (общий поперечный размер 4 мм). Устройство предназначено для позиционирования на поверхности образца, формирования на ней требуемых пространственных параметров лазерного излучения и требуемого потока хладагента. В одной трубке помещали излучающее волокно с продувом воздуха в зазор (для защиты торца от отработанного материала), а через другую трубку в зону обработки подавали охлаждающую струю воздуха или воздушно-капельной смеси. В цикл обработки входил период лазерного облучения, последующий

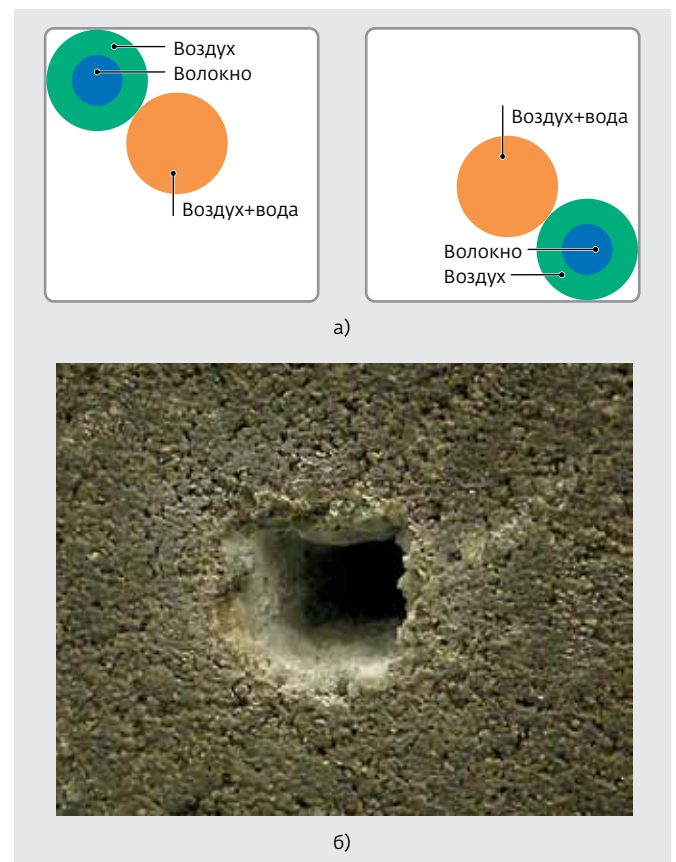


Рис.3. Двухкоординатное бурение: а) схема движения элементов манипулятора при бурении; б) отверстие в образце из бетона (толщина 110 мм)

период охлаждения воздухом и период впрыскивания в струю воздуха воды в момент окончания периода лазерного облучения. При величине мощности излучения 360 Вт получали отверстия диаметром только до 2,5 мм. В бетонных образцах толщиной 10–15 мм на формирование сквозных отверстий требовалось 30–40 с. То есть скорость проходки примерно та же, что и выше (~22 мм/мин), несмотря на удлинение процедуры бурения из-за введения дополнительных этапов охлаждения. Для увеличения поперечного размера формируемого канала в этом случае применяли поперечное сканирование лазерным пучком по площади предполагаемого сечения. Экспериментально опробовали двухкоординатное сканирование, при котором форма сечения образующегося канала получалась близкой к прямоугольной (см. рис.3). Режим обработки тот же. За один цикл сканирования снимали слой материала толщиной 5–7 мм. Из-за того, что площадь обрабатываемой поверхности много больше площади сканирующего пятна излучения, скорость бурения в методе сплошного сканирования существенно ниже.

Высокотемпературное бурение сопровождается нагрев материала вокруг формируемого отверстия. Даже при используемом режиме бурения с водяным вспрыскиванием в зону обработки температура материала у поверхности отверстия после окончания бурения достигала 100–120°C. Нагрев материала, в свою очередь, ведет к появлению в объеме образца температурного градиента за счет процессов теплопроводности. В этом случае тонкое отверстие может стать концентратором возникающих температурных напряжений, что способно привести к разрыву образца по линии отверстия (рис.4а). Кроме этого, углубляя отверстие разными методами облучения (одноточечным или методом поперечного сканирования пятном излучения по площади забоя отверстия), мы встречаемся с трудностями удаления расплавленного материала, что требует повышения мощности лазерного излучения. В свою очередь, из-за теплопроводности и теплоизлучения от расплавленной зоны материал вокруг отверстия нагревается. И поперечный размер расплава на забое глубокого отверстия может превысить не только диаметр лазерного пятна, но и диаметр коронки. Тогда образуется менее вязкий материал, трудный для извлечения. С ростом глубины бурения растет вероятность закупорки отверстия из-за неизбежного загрязнения поверхностей бура и отверстия пролетающими в зазоре между ними остывающими частицами расплава (рис.4б).

По всей видимости, именно перечисленные выше причины преградили путь к успеху проводимым ранее многократным попыткам бурения глубоких отверстий в бетоне с увеличенной мощностью лазерного излучения. Использование чисто высокотемпературного механизма разрушения в бурении глубоких отверстий ограничено.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ БУРЕНИЕ

Бурение, использующее только низкотемпературные механизмы разрушения, это процесс циклического воздействия на зону обработки периодов нагрева и охлаждения. При этом температуры нагрева не превышают температуру плавления материала. Приповерхностный слой в зоне обработки в этом случае подвергается действию знакопеременных напряжений и внутренних давлений, разрушение проявляется в виде отслаивания мелких фрагментов. Мы опробовали такое бурение на кубических образцах из смеси цемента марки 400 с кварцевым песком, выдержанных не менее 60 дней, размером 35×35×35 мм. Источник лазерного излучения – твердотельный лазер ЛТИ-500 (длительность импульса излучения 2 мс, частота следования импульсов 30 Гц, средняя мощность излучения на выходе волокна – 190 Вт). Цикл обработки длительностью около 4 с состоял из периода лазерного облучения рабочей зоны, периода импульсного впрыска воды в зону обработки в момент окончания периода облучения и периода охлаждения воздухом под давлением 4 атм. Циклы повторяли до формирования отверстия заданной глубины. В образце получили сквозное отверстие диаметром 5 мм на входной поверхности и 2 мм – на выходной. При таком режиме сильного накопления тепла в материале не наблюдалось, и температура



Рис.4. *Негативные факторы высокотемпературного бурения: а) разрыв (во время остывания) образца гранита (толщина 25 мм) после формирования в нем сквозного отверстия; б) шарики затвердевшего расплава (диаметр до 1 мм), выносимые воздушной струей из отверстия при бурении бетона*



образца не превышала 45°C. Поверхность нагревалась до температуры ниже плавления за весьма короткое время, это снижало глубину прогрева материала и, следовательно, воздействию знакопеременных напряжений подвергался приповерхностный слой малой толщины. Именно это, в основном, и определяло малую производительность бурения методом, основанным только на низкотемпературном механизме разрушения.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ МЕТОД БУРЕНИЯ

В рассмотренных выше методах лазерного бурения бетона в процесс удаления материала не были вовлечены эффекты теплового ослабления микроструктур составляющих его компонентов. При нагреве происходит ослабление цементного камня за счет разрушения водно-химических связей структуры цемента при температурах 800–900°C, в результате этого уменьшается сила сцепления агрегатов в бетоне. При охлаждении происходит растрескивание кристаллов кремнезема за счет фазового превращения в области температур 550–600°C внутри объема всех кремнеземсодержащих составляющих бетона (цемент,

агрегаты). Процесс локального растрескивания микроструктур никак не проявляется на внешнем состоянии бетона из-за изотропного характера разрушения по объему. То есть эти фазовые превращения структуры кремнезема в слоях не воздействуют механически направленно на массив бетона, что необходимо для деформации или разрушения его поверхности. Требуется механическое вмешательство для снятия ослабленного слоя бетона. Расчетные оценки показывают, что введение в процедуру лазерного бурения операции механического удаления слоя с ослабленным материалом увеличивает в несколько раз глубину отверстия, формируемого за цикл обработки.

Мы провели эксперименты по бурению с помощью комбинированного лазерно-механического метода, который включал в себя стадии лазерного локального нагрева материала до температур его испарения, последующего охлаждения и механического воздействия. Локальный нагрев до температур испарения формирует кратер с расплавом материала в его полости (несмотря на испарение материала, больший его объем в кратере все же находится в жидкой фазе). Охлаждение, во-первых, остужает расплав в полости кратера



Рис.5. Комбинированный лазерно-механический метод бурения: а) механическая обработка; б) отверстие (диаметр 10 мм) в бетоне (толщина 35 мм)

до стеклообразного состояния. Во-вторых, создает условия для низкотемпературного структурного превращения кремнезема в массе материала вокруг кратера (за фронтом плавления в слоях материала с более низкими температурами нагрева), ведущего к ослаблению материала. Механическое воздействие направлено на дополнительное увеличение глубины отверстия измельчением ослабленного материала и удалением шлама из зоны обработки воздушной струей.

Присутствие слоя ослабленного материала вокруг оплавленной зоны кратера позволяет использовать режущую коронку большего диаметра, чем диаметр пятна излучения. Тогда объем удаляемого материала увеличивается. С учетом этого факта наиболее технологичным способом бурения отверстий с круговым сечением в методе поперечного сканирования стал

метод многоточечного последовательного воздействия лазерного пучка определенного диаметра по круговому периметру отверстия (метод вскрытия). При этом одноточечный характер облучения сохраняется. Периодический поворот за время 80 с манипулятора (колонковая трубка с ребристой коронкой на рабочем конце) вокруг своей продольной оси на $\pm 360^\circ$ обеспечивает поперечное перемещение лазерного пятна по обрабатываемой поверхности материала. При этом излучающее волокно, закрепленное на внутренней поверхности колонковой трубки, перемещалось по круговой траектории по периметру кольца диаметром 10 мм. Это дало возможность перекрыть материал в осевой части отверстия тепловыми зонами ослабления от локальных пятен лазерного воздействия. Торец волокна отстоял от обрабатываемой поверхности на 10 мм. Режим лазерной обработки был циклическим: нагрев излучением (мощностью 340 Вт, за время 2 с), последующее охлаждение потоком воздуха (за время 2,5 с) с одновременным впрыскиванием воды в воздушный поток в момент окончания лазерного облучения. В момент лазерного воздействия из зоны обработки за счет испарения частично выносятся материал. Завершал цикл после полного оборота манипулятора этап механической обработки. Колонковая труба с коронкой выдвигалась вперед до касания с материалом и под действием продольного усилия торцевыми и боковыми резцами крошила хрупкую систему из затвердевшего расплава с окружающей ослабленной подложкой материала, продвигаясь вперед (рис.5а). Образующийся столбик ослабленного

материала в центре колонковой трубки постепенно с углублением крошился. Измельченный материал выносился из канала потока подаваемого воздуха. Затем циклы повторялись до получения заданной глубины. Для применения одноточечного лазерного бурения в комбинированном лазерно-механическом методе оказалось достаточно для формирования отверстия диаметром 10–12 мм воздействовать на материал пятном излучения диаметром 6 мм при мощности ~500 Вт. Тонкий пучок за счет испарения материала на оси предполагаемого отверстия формирует кратер с характерным суживающимся в продольном

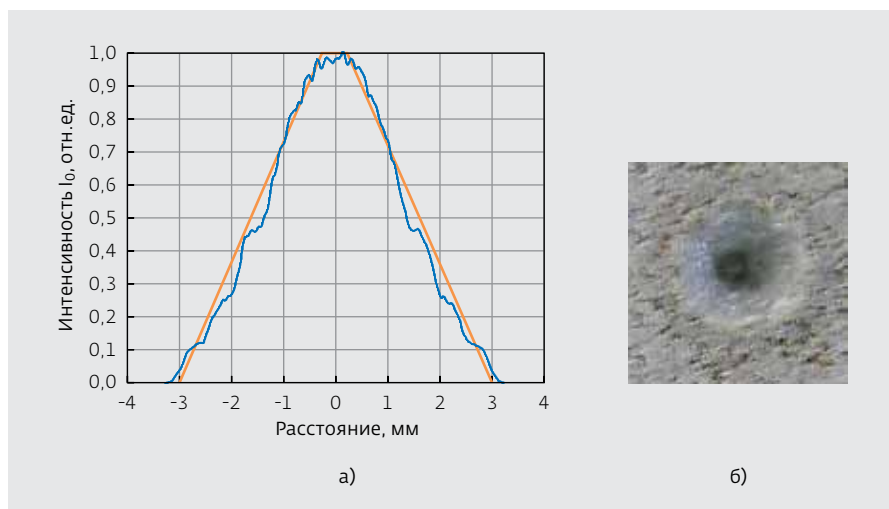


Рис.6. Подobie радиального распределения профилей: а) распределение интенсивности излучения в плоскости на расстоянии 30 мм от выходного торца волокна; б) кратер



Рис.7. Входные отверстия, пробуренные высокотемпературным методом за счет испарения и плавления (слева) и лазерно-механическим методом с диаметром головки бура 10 мм (справа) (диаметр лазерного пятна на материале 6 мм)

направлении радиальным профилем, близким по форме к радиальному распределению плотности энергии в сечении пучка излучения (рис.6). В материале вокруг затвердевшего кратера в процессе охлаждения образуется зона с ослабленной структурой. По направлению оси кратера и внедряется вращающаяся режущая головка большего диаметра, легко разрушая с торца наклонные хрупкие слои материала разной прочности и формируя отверстие с ровной боковой поверхностью.

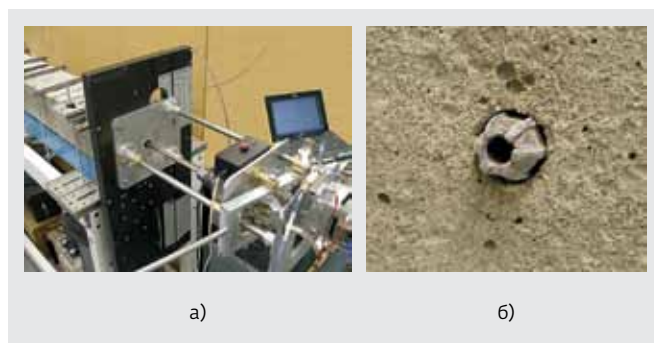


Рис.8. Эксперимент: а) стенд для бурения; б) выход головки лазерно-механического бура через сквозное отверстие в бетоне

Из рис.7 видно, что при чисто лазерном бурении отверстие имеет оплавленную неровную боковую поверхность, а лазерно-механический метод создает отверстие с четко сформированной, ровной, и главное – проницаемой поверхностью. Такое качество важно в ряде применений, например в нефтегазовой отрасли для повышения эффективности вскрытия скважин локальным бурением в породе, окружающей боковые отверстия.

Головная часть лазерного бура, используемого в эксперименте, представляет собой колонковую



трубу с ребристой коронкой с тугоплавкими резами. Вдоль ее оси в металлической трубке размещено оптическое волокно. Для охранного обдува его выходного торца по трубке постоянно подается воздух. В период механической обработки материала поток воздуха в трубке усиливается для выноса измельченных частиц материала из зоны обработки. Частицы уносятся через зазор между внутренней поверхностью колонковой трубы и внешней поверхностью трубки. Этот зазор можно также использовать для подачи в зону обработки воздушно-водяной смеси, ускоряющей процесс остывания материала. Колонковая труба с коронкой вращалась с постоянной угловой скоростью ~1 оборот/с. Волокно не вращается, его торец отдален от поверхности материала на такое расстояние, что диаметр пятна излучения на поверхности равен ~6 мм. После облучения и охлаждения забоя отверстия бур продвигался вперед, механически измельчая ослабленный материал. После продвижения на расчетную глубину бур вдвигался обратно и цикл повторялся.

Экспериментальная отработка комбинированного лазерного инструмента производилась на стенде (рис.8а). Образцы для бурения – блоки 300×150×120 мм из бетона марки 300. Элементы тесно укладывались последовательно друг за другом на оптический рельс и фиксировались стальными стяжками, набирая длину материала. В качестве источника лазерного излучения использовали волоконный лазер YLR-500. Магистральное оптическое волокно диаметром 400 мкм и длиной 15 м с охлаждаемым оптическим разъемом доставляло излучение в зону обработки. Мощность излучения на выходном торце магистрального волокна составляла 490 Вт. Облучение длилось 6 с, затем работал сильный охлаждающий воздушный поток в течение 10 с, после чего механически измельчали материал и потоком воздуха удаляли шлам. Формирование скважины глубиной 3–5 мм проходило за один цикл бурения длительностью 30–40 с.

На первый взгляд, ввод в процедуру лазерного бурения пассивных циклов охлаждения и механического измельчения материала уменьшает производительность комбинированного лазерно-механического метода по сравнению с активным высокотемпературным методом на основе испарения и плавления. Да, это справедливо для режимов нагрева поверхности до температур, намного превышающих температуру кипения материала. Однако при нагреве ниже этих температур, согласно расчетам, по производительности оба

метода бурения соизмеримы, а в случае обеспечения наибольшей толщины расплавленного слоя эффективность лазерно-механического метода выше. Так, при нагреве поверхности до температуры кипения кремнезема 2800°C пятном излучения диаметром 6 мм с плотностью тепловой мощности 100 Вт/см² глубина залегания теплового фронта с температурой 600°C равна ~3,5 мм и объемная скорость удаления материала составляет ~395 см³/(ч·кВт) при диаметре коронки 10 мм и ~575 см³/(ч·кВт) при диаметре коронки 12 мм (поперечные размеры ослабленной зоны допускают такой размер).

Объемная скорость удаления материала только выдувом расплава (толщина расплавленного слоя 0,9 мм) из отверстия диаметром 6 мм для данного режима почти в два раза меньше и составляет ~250 см³/(ч·кВт).

С уменьшением плотности тепловой мощности увеличивается толщина ослабленного слоя, что создает преимущества для использования комбинированного лазерно-механического метода. Анализ четко указывает на необходимость оптимизации режимов лазерно-механической обработки для достижения максимальной производительности бурения. Кроме того, в области температур нагрева поверхности 2000–2800°C производительность этого метода превышает величину производительности для чисто высокотемпературного метода бурения, применение которого чревато закупоркой отверстия шлаками в случае его большой глубины. Вне указанной области температур производительность комбинированного метода бурения падает.

Только лазерно-механический метод бурения обеспечил возможность получения в бетоне глубоких отверстий диаметром 10 мм и длиной до 10 м (рис.8б). Метод позволяет в процессе бурения регулярно удалять тепло из забоя отверстия, то есть вероятность разрушения на тонком отверстии массива материала из-за возможного его перегрева снижается. Это позволяет бурить отверстия в изделиях с относительно малыми поперечными размерами.

Следует отметить, что при обработке бетонных образцов скорость бурения резко менялась с продвижением в зависимости от наличия заполнителей разной твердости на пути лазерного бора. В цементном растворе скорость бурения возрастала, а при попадании бора на участки со светлыми кварцевыми включениями резко падала. Для восстановления скоростных показателей бурения в последнем случае вдвое увеличивали



как длительность нагрева, так и период охлаждения перед процессом механической обработки. Загрязнение поверхности отверстия (нарастание материала на поверхности) пролетающими расплавленными частицами по мере его углубления устраняли механически при каждом проходе режущей коронки.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Wignarajah S., Sugimoto K., Nagai K. Trends in high power laser applications in civil engineering. – Proc. SPIE 2004, v. 5777, p. 829–839, XV International Symposium on gas flow, chemical lasers and high-power lasers.
2. Hilton P. Fibre lasers for surface removal of contaminated concrete in the nuclear sector. – Proceeding of 29rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2010, p. 1305.
3. Xu Z. et al. Specific energy for pulsed laser rock drilling. – Journal of Laser Application, 2003, v. 15, № 1, p. 25–30.
4. Журба В.М., Митькин В.М., Шишковский В.В. Свойства газовых термоминз, наводимых в зоне лазерного сверления с принудительным обдувом. – Оптический журнал, 2004, т. 71, № 5, с. 14–16.
5. Журба В.М., Иванов В.Н., Кобилов И.М., Митькин В.М. Удельная энергия лазерного разрушения ряда строительных материалов. – Оптический журнал, 2007, т. 74, № 8, с. 61–65.
6. Васильев М.В., Журба В.М., Митькин В.М., Щепкин А.Д. Низкотемпературное разрушение кремнеземсодержащих материалов лазерным излучением. – Физика и химия стекла, 2012, т. 38, № 3, с. 393–401.
7. Прянишников В.П. Система кремнезема. – Стройиздат, Л., 1971.

LASER DRILLING OF SMALL DIAMETER DEEP HOLES IN SILICA-CONTAINING MATERIALS

M. Vasiliev, Cand. Phys.-Math. Sc.; V. Zhurba; V. Mit'kin, Dr. Eng. Sc.; V. Romanov, A. Schepkin, NPP "VOLO", St. Petersburg

Mechanism of laser destruction of a rock depends on heating temperature. The destruction is usually effected by several mechanisms at once, their prevalence depends on the material. At first thought, introduction of passive cooling and mechanical grinding cycles into laser drilling leads to reduced performance. But this is the case only when heating the material above its boiling point. At lower heating temperatures, prevalent destruction mechanism is associated with weakened layer.

Over the last 20 years, there is a dramatic increase of the power of solid-state lasers. This is due to the introduction and development of new types of compact lasers (such as diode-pumped, diode and fibre optic lasers). Relatively low cost of emitters with powers above 1 kW has led to their commercial availability to wide-profile researchers. High-power laser light is now utilized for cutting and drilling thick and bulk materials (concrete, natural stone etc.) [1–5].

For example, most efficient usage of noiseless and vibration-free laser technologies in civilian engineering [1] is drilling holes in existing concrete structures in seismically active regions. Such holes are necessary for reinforcement of failing structures with steel braces and so on, as well as for restoration of antique buildings and construction units [5]. Same technology can be used to prevent landslides [1] when drilling blast holes in dangerously unstable shear rock faces.

High-power laser radiation is used in nuclear industry [2] for decontamination of decommissioned concrete structures. Key advantage of laser peeling of the contaminated surface layers and cutting concrete is low dust release. Another important feature is remote process control, i. e. placing equipment away from the object. Delivery of laser radiation to the processing area via optical fibre allows to use laser drilling to make small diameter test holes in several meter thick concrete walls of radioactive waste burial sites [5].

High-power laser radiation is used in oil and natural gas industry [3] to rejuvenate abandoned wells, as well as for more

efficient uncapping of existing wells. It is achieved by means of perforating boring casings and drilling local lateral holes in the rock surrounding the well (such as cemented aggregate, sandstone, limestone, slate etc.).

Optimal and most efficient processing conditions for laser thermal treatment of various materials are selected according to the specific purpose of treatment. Physical processes and mechanisms of destruction of materials by laser radiation should be well understood. Laser destruction of a rock is driven both by heating of the material due to absorption of light and by heat gradient due to thermal conductivity. Means of destruction can be divided into low- and high-temperature mechanisms. Conditions favouring low-temperature destruction are met at the temperatures of elastobrittle state during heating and cooling stages. For example, rapid heating of the surface of a sample leads to appearance of a thermal gradient in thin subsurface layer. This leads to tangential thermal loads in the layer. If those loads exceed shearing strength of the material, local destruction occurs, which manifests as flaking and thermal fracture. The flaking can also be caused by the pressure exercised by rapidly expanding free water (which can be found in porous subsurface pores of the concrete at temperatures about 200°C), and chemically bound water, which is partially released from cement at temperatures between 800–900°C. During cooling of a heated surface, thermal gradient again leads to development of tensile loads. Such loads can also exceed the strength of the material and cause



fracturing. High-temperature destruction mechanism occurs at the temperatures of fluxing (such as melting, evaporation or thermal decomposition).

Therefore, destruction of a rock under high-power laser radiation is due to chipping of surface layer caused by temperature difference and internal pressure gradient, as well as melting, evaporation and thermal decomposition of the material directly under laser spot. To improve efficiency of laser destruction, high-pressure gas stream is used to remove the flux from the treatment zone; rapid cooling of the flux and fracturing of vitrified material (slag) is achieved by introduction of a liquid into the gas stream. These operations are supplemented by mechanical grinding and removal of the slag, introduction of powdered reducing agents into the treatment zone to lower melting temperature of the silica, and so on. The destruction is usually effected by several mechanisms at once, their prevalence depends on the aggregate material. Thus, the destruction of the concrete with quartzite or basalt aggregates is mostly by melting, and internal pressure effects are less prominent. On the other hand, concrete with crushed limestone aggregate undergoes explosive destruction with pieces of concrete blowing out, but without melting marks on the processed surface [2]. Each kind of rock is characterized by different specific destruction energy [3,5].

EFFECT OF THERMAL WEAKENING OF SILICA-CONTAINING MATERIALS

Let us discuss the results of laser drilling of small diameter deep holes in silica-containing materials, as exemplified by concrete. We emphasize low temperature mechanisms of destruction of a rock during drilling, and most of all the effect of thermal weakening. Mechanism of thermal weakening of silica-containing materials (which include virtually any natural rock or artificial construction material), is discussed in detail in [6]. Reversible transition from low-temperature β -quartz to high-temperature α -quartz at 573°C leads to structural weakening

[7]. It is a displacement-type phase transition, which occurs without breaking chemical bonds and is accompanied by increase of the volume by about 0.86%, which points to minor structural changes. However, such minor structure changes in silica lead to noticeable shift of various physical properties of the material within the temperature range of the phase transition. Therefore, high levels of internal stress occur within the crystal at the transition temperature [7]. Transition from β -quartz to α -quartz is accompanied by gradual change of physical properties within a certain temperature range. It is due to gradual increase of content of α -quartz within β -quartz, culminating in total conversion at the transition temperature (~573°C). Therefore, internal stress caused by heating to and above the transition temperature does not lead to fracturing. This fact is confirmed by experiment [7], which consisted of heating 0.3-0.5 mm samples at a rate of 100°C/min. On the contrary, reverse transition from α - to β -quartz is accompanied by abrupt change of physical properties at the transition temperature. This leads to abrupt decrease of the volume and, subsequently, fracturing of the crystal due to the peak internal stress exceeding its tensile strength. It should be noted that rapid heating attributed to laser drilling may cause fracturing even during heating. But this still needs experimental confirmation. In [6], weakening was demonstrated in concrete, brick, granite and sand-cement mixture, both by ohmic and laser heating of thin and bulk samples followed by cooling. Most prominent example of the weakening was demonstrated by the experiment described below. 3 mm thick concrete tile was heated by incident radiation from a 100 W fibre laser (10 mm exposure spot diameter at the outer surface of the sample). Surface temperature of the sample was monitored by means of a thermocouple attached to the opposite side of the tile, along the axis of the laser beam. When the temperature reached 700°C, the radiation was switched off, and the sample was allowed to cool passively by ambient air. At the moment of laser deactivation, the temperature at the exposure spot on the outer face, as calculated for the specified



heating rate (i. e. 200°C/s), was just about melting temperature of the material. This is evidenced by appearance of an 8 mm diameter ablation spot on the outer surface (see fig. 1a). During cooling, hardness of the material was determined at the back side of the sample by scratching it opposite of the front-side ablation spot. The weakening was observed only after cooling below -130°C. The weakening made it possible to scrape out a spot about 8 mm in diameter with a wooden stick (see fig. 1b). The obtained result has demonstrated that even after rapid heating produced by laser irradiation, weakening of silica occurs at the cooling stage. Therefore, to drill silica-containing materials, local heating to high temperatures associated with melting and evaporation is not necessary. It is sufficient to heat the material to just above 600°C, then cool it to weaken the structure, grind by mechanical means and remove the debris with air stream.

HIGH-TEMPERATURE DRILLING.

Experimental drilling of deep holes began with studies of high-temperature destruction mode. The drilling method consists of local laser heating of the material to the melting temperature, subsequent evaporation and removal of destruction debris (e. g. with air stream). Next layers are heated in succession and also undergo melting and evaporation. Boundary of the area of heating by absorption of the laser radiation moves deeper into the material along the beam axis, also expanding sideways of the laser spot due to thermal conductivity.

We studied granite and concrete samples irradiated with 120 W fibre laser. After collimation, the radiation was focused by means of a long-focus lens ($F=375$ mm). Longitudinal motion of the sample within 200 to 330 mm of the lens allowed to vary the power density of the radiation within the area of effect. Compressed air (1.8 atm) was introduced to the treatment zone via a thin tube at a smallest possible angle to the axis of the laser beam. Fig. 2 shows the time of through-hole drilling of concrete vs. sample thickness under continuous beam condition. The experimental geometry described above produced holes with entry diameter ~2 mm and exit diameter ~1 mm.

When using a focusing lens to deliver the radiation to the treatment zone of a bulk sample, depth of the formed holes was comparable to the constriction length of the focused laser beam. So, the focal constriction length is the factor that constrains the drilling depth and limits the potential hold depth in solid rock. To overcome this limitation, the plane where the required radiation density is attained must be gradually shifted along the laser drilling axis. Such longitudinal shift can only be achieved by means of laser light delivery via optical fibres [4]. When using a single-point irradiation mode, the diameter of the drilled hole must be greater than the diameter of the fibre optic cable to move it through the hole. That means higher radiation power is required. The diameter of the hole is determined by the diameter of the exposure spot. In this case, the spot diameter itself depends on the distance between the face of the optical fibre and the material surface. As the drilling progresses, this distance must be kept constant. For the following experiments we used high-power lasers combined with optical fibre delivery of the laser radiation to the drilling zone. The means of delivery were a 600 μ m quartz-quartz optical fibre trunk which could efficiently accommodate the radiation from fibre as well as solid-state lasers. Using a LTI-500 solid state laser, we achieved 360 W of radiating power at the fibre output.

First setup of the drilling head consisted of two appressed 2 mm diameter tubes (so total cross dimension was 4 mm). The unit is intended for positioning on the sample surface and providing the required spatial parameters of laser radiation and coolant flow. One of the tubes housed optical fibre and air blow gap (to protect the face from debris), and the other was used to deliver the cooling air or aerosol. Processing cycle consisted of laser irradiation followed by air cooling and then by injection of water into the air stream at the moment when irradiation stops. 360 W radiating power allowed to achieve hole diameters up to 2.5 mm. Through-hole drilling of 10 to 15 mm thick concrete samples took 30 to 40 seconds.

That means the same penetration rate as above (~22 mm/min) despite lengthening of the drilling procedure by introduction of additional cooling stages. To increase the diameter of the hole, transverse scanning by the laser beam across the required hole area was employed. We tested two-coordinate scanning and achieved near-rectangular cross-section of the borehole (fig. 3). The processing mode was the same. Each scanning cycle allowed to cut away 5-7 mm thick layer. Due to the fact that the processed surface is much bigger than the area of the exposure spot, the throughout scanning mode produces substantially lower penetration rate.

High-temperature drilling is associated with material heating around the borehole. Even in the described setup with water injection into the processing zone, temperature of the material at the hole surface after drilling was about 100-120°C. Such heating leads to thermal gradient formed by conduction of heat. Small diameter hole can concentrate the occurring thermal stress leading to sample fracture along the hole (fig. 4a). Moreover, as the hole deepens (whether by single-point drilling or by transverse scanning with the exposure spot across the borehole), the issue of removal of molten material becomes more and more prominent, which calls for additional increase of laser power. Thermal conductivity and heat emission from the molten area heats the material around the hole. So, the dimension of the molten area in deep boreholes can exceed not only the diameter of laser spot, but also the drill bit diameter.

This leads to formation of less viscous material which is difficult to remove.

As the drilling depth increases, there is an increased risk of hole clogging due to inevitable contamination of the drill bit and hole surface by cooling molten particles which are blown between them (fig. 4b). Apparently, the issues that stood in the way of many previous attempts of deep drilling of concrete with increased laser power were those listed above. It can be concluded that pure high-temperature destruction mechanism is of limited use when drilling deep holes.

LOW-TEMPERATURE DRILLING

The purely low-temperature destruction mode of drilling consists of cyclic heating and cooling of the processed area. In this case the heating temperature does not exceed the melting point of the material. Surface layer of the material within processing zone is undergoes alternating stresses and internal pressure cycles and gradually flakes away. We tested such drilling mode on 35x35x35 mm cubical samples of concrete made from grade 400 cement mixed with quartz sand, cured for no less than 60 days. The laser source was a LTI-500 solid-state laser (pulse length - 2 ms, pulse frequency - 30 Hz, average radiation power at the output face of the fibre - 190 W). Processing cycle was about 4 s long and consisted of laser irradiation of the processing area, impulse injection of water into the area at the moment when the laser is switches off, and subsequent cooling with compressed air (4 atm pressure). The cycle had been repeated until the required hole depth was achieved. We obtained though hole with entry diameter of 5 mm and exit diameter of 2 mm. In such mode there were no heat accumulation in the material, so the sample temperature did not exceed 45°C. The surface heated to sub-melting temperature very quickly, which reduced the depth of heat penetration into the material, and only a thin surface layer was subjected to alternating stress. That was the primary factor leading to low penetration rate of the pure low-temperature destruction drilling mode.

COMBINED LASER AND MECHANICAL DRILLING METHOD

The methods of laser drilling described above did not utilize thermal weakening effects in the process of material removal. Heating leads to weakening of cement rock due to breaking of water-cement chemical bonds in the 800-900°C temperature range. That causes weakening of the adhesion strength of the aggregate constituents of the concrete. Cooling causes fracturing of silica crystals due to phase transition in the temperature range of 550-600°C, which affects all



silica-containing constituents of the concrete (i. e. cement and aggregates). This local fracturing of the microstructures does not affect the apparent condition of the concrete because the destruction is isotropic. To elaborate, these phase transitions in the silica layers do not cause any mechanical effects on the bulk of concrete, which would be required to distort or destroy its surface. To remove the weakened concrete layer, mechanical action is necessary. As the numerical estimates show, combining laser drilling with mechanical removal of weakened material layer allows to increase hole depth produced in a single processing cycle by a factor of several times.

We experimented with combined laser-mechanical drilling method which consisted of local laser heating of the material to evaporation temperature, subsequent cooling and mechanical action. Local heating to the evaporation temperature forms a crater filled with molten material (despite the evaporation, most of the crater remains in the liquid phase). First thing the cooling does is vitrification of the flux within the crater. Second achieved effect is low-temperature structural transition of the silica adjacent to the crater (in the less heated areas beyond the melting front), which leads to structural weakening of the material. Mechanical action is intended to increase the hole depth by grinding away the weakened material and removing the cuttings with an air stream.

Presence of a weakened layer around the ablation spot allows to utilize drilling bit of higher diameter than the laser spot. Therefore, more material is removed. Taking this into account, most technologically feasible method for drilling circular holes with transverse scanning was found to be consequent multipoint irradiation of the hole circumference with a certain diameter laser beam (stripping method). Single-point irradiation mode was retained. Alternating rotation of the drilling arm (which consists of a core pipe topped with a webbed crown) by $\pm 360^\circ$ about its longitudinal axis with a period of 80 s provided the required movement of the laser spot around the drilled surface. The laser fibre was attached to the inner surface of the core pipe and moved around the perimeter of a 10 mm diameter circle. That allowed to overlap the material at the centre of the hole with thermal weakening zones created by local heating spots. Fibre face was 10 mm away from the processed surface. The laser exposure mode was cyclic, i. e. radiation heating (340 W for 2 s), then air cooling (for 2.5 s) simultaneously with injection of water into the air stream at the moment of laser deactivation. Some material was removed from the drilling zone by evaporation during laser heating. After full rotation of the drilling arm, a mechanical processing stage took place. The core pipe with the crown advanced till the contact with the material, then ground the brittle solidified flux and weakened subsurface material with its chisel and cutting edges, advancing further under longitudinal load. A core of weakened material was forming within the core pipe, then crumbling as the drilling progressed. Disintegrated material was removed from the bore with air stream. The cycle was repeated until the required hole depth was achieved. Single-point laser drilling by means of combined laser and mechanical method allowed to make 10-12 mm diameter holes using 6 mm diameter laser spot from a ~500 W laser. Due to the evaporation of material along the axis of the hole, thin beam forms a crater with distinctive tapering profile. Its shape is close to the radial distribution of energy density across the beam (fig. 6). During the cooling stage, a weakened zone forms around the solidified crater. Higher-diameter rotating drill bit is fed along the axis of the crater. It easily cuts away brittle layers of various-strength material, providing smooth surface of the hole. Fig. 7 shows that pure laser drilling produces a hole with uneven ablated surface, whereas combined laser-mechanical drilling produces a hole with clear-cut, smooth and, above all, permeable surface. The last factor is crucial for many applications, e. g. for more efficient uncapping of wells by drilling local lateral holes in the surrounding rock.

The head of the laser drill bit we used in the experiment was a core pipe with a webbed crown fitted with heat-resistant cutting bits. Along the axis of the core pipe, runs a metal pipe

housing the optical fibre. A stream of air is fed continuously to that pipe to protect the fibre face from debris. During the mechanical cutting stage, the flow of air is increased to facilitate the removal of ground material. The particles are evacuated through the gap between the outer surface of the internal pipe and inner surface of the core pipe. The same gap can be used also for injection of water-air mixture for rapid cooling of the material. The core pipe with the crown rotated with a constant speed of ~1 rotation/s. The optical fibre was not rotating. Its face was positioned at some distance from the processed material as to create ~6 mm diameter illuminated spot. After irradiation and cooling of the borehole bottom, the drill bit advanced to ground the weakened material mechanically. After reaching a certain depth, the drill bit was pulled back, and the cycle repeated.

A rig used for experimental operation of the combined laser tool is shown in fig. 8a. Drilled samples were 300×150×120 blocks of grade 300 concrete. The blocks were positioned back-to-back along the optical rail and braced with steel bars to achieve the required length of the material. Fibre laser YLR-500 was used as the radiation source. To deliver the radiation to the processing zone, we used 15 m of a 400 μm diameter optical fibre trunk with cooled optical connector. Radiation power output of the fibre was 490 W. 6 s of irradiation were followed by 10 s of cooling by strong airflow and then by mechanical grinding and removal of debris by means of air stream. One drilling cycle took about 30-40 s and produced a 3-5 mm deep borehole.

At first thought, introduction of passive cooling and mechanical grinding cycles into laser drilling leads to reduced performance of such combined laser-mechanical method as compared to active high-temperature method based on evaporation and melting. This would really be the case when heating the surface to the temperatures well above boiling point of the material. However, if lower heating temperatures are used, estimated penetration rates of these drilling methods are comparable, moreover, if maximum thickness of molten layer is attained, the combined laser-mechanical method becomes more effective. Thus, when heating silica surface to its boiling point of 2800°C using a 6 mm diameter laser spot with power density of 100 W/cm², the 600°C temperature front lies about 3.5 mm below the surface. Volumetric material removal rate is ~395 cm³/(hr·kW) when using 10 mm diameter crown, and ~575 cm³/(hr·kW) with 12 mm diameter crown (cross dimensions of the weakened zone allow to use such a bit).

Volumetric material removal rate by means of blowing out the flux (molten layer is 0.9 mm thick) from a 6 mm diameter hole in such mode is nearly two times less, i. e. ~250 cm³/(hr·kW).

As the thermal power density decreases, the thickness of the weakened layer increases, providing further advantage to the combined laser-mechanical method. The analysis clearly indicates that mode optimization of the laser-mechanical drilling is necessary to achieve maximum drilling performance. Moreover, in the heating temperature range of 2000-2800°C this method outperforms purely high-temperature drilling, which is prone to clogging of deep holes with slag. Outside of this temperature region, the performance of the combined drilling method somewhat decreases. The laser-mechanical method is the only one capable of producing 10 mm holes in the concrete to the depth up to 10 m (fig. 8b). This method allows for routine removal of heat from the borehole bottom, which reduces the risk of fracturing the bulk of the material around small diameter hole due to overheating. This allows drilling holes in parts with relatively small lateral dimensions.

It should be noted that, when drilling concrete samples, the penetration rate varied greatly as the drill bit encountered aggregates of various hardness. Cement mortar was drilled very quickly, whereas bright quartz inclusions reduced the drilling speed. In the latter case, to achieve higher penetration rate, duration of heating and cooling stages before the mechanical grinding was increased by a factor of two. Buildup of debris from molten particles coalescing on the surface of the hole was removed mechanically at each mechanical cutting stage. ■