



## ГЛУБИНА КАНАЛА ПРОПЛАВЛЕНИЯ – ВСЕГО ЛИШЬ ДИСТАНЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ

Т. Бауцц\*, М.Когель-Холлакер, Precitec\*\*

Датчик для измерения глубины проплавления непосредственно в процессе сварки, разработанный компанией Precitec, позволяет повысить качество сварного шва. В статье обсуждается процесс лазерной сварки, особенности формирования канала проплавления, сварного шва, а также о глубине канала.

Компания Precitec разработала датчик для измерения глубины проплавления непосредственно в процессе сварки. Процесс измерения основан на низкокогерентной интерферометрии. С использованием данной методики становится возможным с высокой надежностью получать результаты измерений, несмотря

## KEYHOLE DEPTH IS JUST A DISTANCE THE IDM SENSOR IMPROVES LASER WELDING PROCESSES\*

T.Bautze\*\*, M.Kogel-Hollacher\*\*\*

Talking about laser welding predominately means talking about the generation of a keyhole, the physics behind and invariably the depth of this steam capillary. Having the ability to measure this depth would undoubtedly raise the confidence in laser welding and also raise the quality of the processed part on a higher level.

With the IDM (In-Process Depth Meter), Precitec developed a sensor system that is able to measure the depth of the keyhole in-process. On the basis of low-coherence interferometry, with a high robustness of the measured values against process emissions, the system is perfectly qualified to provide the measurement that the industry has been asking about for decades.

As a leading manufacturer of processing heads, Precitec is able to provide a solution that is easy to integrate into existing optics. As a leading manufacturer of non-contact measurement systems, the company is also able to reduce the hardware to the

\* Тибалт Бауцц менеджер по продукции в Precitec GmbH & Co. KG с 2010 года. До этого изучал электротехническую инженерию в университете Карлсруэ. Завершил обучение в Мюнхенском техническом университете, где работал над задачей обработки данных для лазерных приложений. Свою деятельность в Precitec начал с опытно-конструкторских работ, затем стал лидером в отделе разработки. В настоящее время занимается оптимизацией процесса лазерной сварки и системы мониторинга.

\*\* Маркус Когель-Холлакер начал работать с лазерной техникой во время подготовки магистерской диссертацией (Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена, Германия) в Институте лазерных технологий им.Фраунгофера в 1994 году. С 1996 года работает в Precitec Optronik GmbH. В 2008 защитил докторскую диссертацию в Берлинском Техническом Университете (Германия). Занимая должности главы отдела разработок, курирует проекты, финансируемые правительством. Является членом совета директоров в LIA (Американский лазерный институт). Обладатель третьего места в конкурсе инновационных лазерных технологий 2012 года и второго места 2014 года.

\* Article first published online: 8 SEP 2014 | DOI: 10.1002/latj.201400040, Laser Technik Journal, 2014, v.11, №2, p.39-43

\*\* Thibault Bautze works as product manager for Precitec GmbH & Co. KG. Before joining Precitec in 2010, he studied electrical engineering at the University of Karlsruhe and completed his studies at the Technical University of Munich. There he worked in the field of data processing for laser applications. At Precitec he started with R&D-projects and became team leader in the systems development department. Nowadays, his focus lays on laser welding and process monitoring solutions.

\*\*\* Markus Kogel-Hollacher began his activities in the area of lasers while working for his MS degree (RWTH Aachen University, Germany) at the Fraunhofer Institute for Laser Technology in 1994. In 1996 he joined Precitec Optronik GmbH. In 2008 he obtained his Ph.D. at the Technical University of Berlin, Germany. In his position as head of the department R&D projects he oversees governmentally funded projects. At present, he is a member of the board of directors at the LIA and earned the 3rd place in the Innovation Award Laser Technology in 2012 and the 2nd place in 2014.

на интенсивное испарение металла в процессе сварки. Система опробована и позволяет получать результаты, которые ожидалось в данной отрасли в течение десятилетий.

Являясь ведущим производителем модулей для лазерной обработки поверхностей и бесконтактных измерительных систем, фирма Precitec предоставляет возможность поставки решений, легко интегрируемых в оптическую систему заказчика. Продукция Precitec славится своими компактными габаритами, она доказала применимость для сотен приложений.

Существенной причиной значительного расширения использования лазерной техники в различных областях промышленного производства является ее эффективность в сравнении с конкурирующими технологиями. Другая причина - уникальные особенности лазерного луча как самостоятельного рабочего инструмента. Для получения пользы от этого инструмента, необходимо контролировать производственный процесс с высокой степенью автоматизации. Мониторинг процесса лазерной сварки не является проблемой, однако управление процессом представляет собой непростую задачу из-за влияния на результат обработки изделия множества входных параметров.



*Автоматический контроль за ходом технологического процесса с помощью датчика производства Precitec*

most compact size. Both have proven their industrial suitability in hundreds of applications.

A substantial reason for the increasing use of the laser in numerous fields of industrial production is the increased efficiency in comparison with competing techniques. Another reason would be the unique features of the laser beam as a tool itself. To really gain a profit by the use of this tool, a highly

Поскольку только непрерывный контроль производственного процесса может гарантировать высокое качество получаемых изделий, системы производственного мониторинга становятся все более и более стандартизованными. Не существует никаких сомнений, что для надежного онлайн мониторинга процесса сварки необходимо измерять множество параметров, которые несут в себе информацию о состоянии области взаимодействия излучения с веществом и/или близлежащих областей.

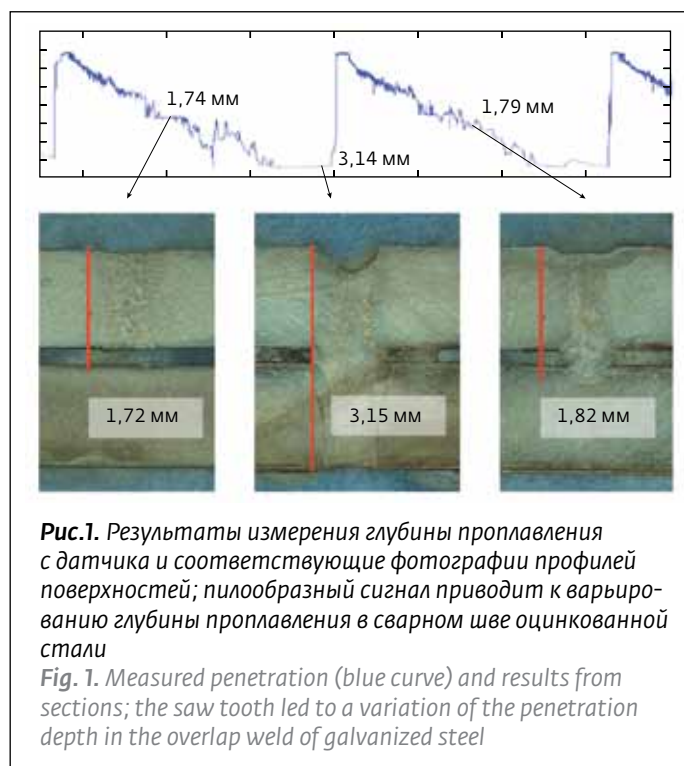
Одним из наиболее важных параметров, который необходимо измерять для оценки прочности сварного шва по отношению к механической нагрузке и давлению, является глубина канала проплавления. Существуют многочисленные подходы, касающиеся исследования зависимости глубины канала и измеряемого сигнала. Эти подходы широко обсуждались в научно-исследовательских группах, и некоторые из них нашли отражение в промышленных приложениях. Их общей чертой является необходимость в базовом понимании процесса взаимодействия излучения с материалом для установления зависимости между сигналом и качеством шва. Данные методы позволяют получить информацию об оценке глубины канала, а не просто информацию о ее точной величине.

Датчик производства Precitec позволяет проводить точные измерения глубины проплавления. Далее в статье будет представлена информация об упомянутой технологии и ее применении на практике.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ В ЛАБОРАТОРИИ И НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Принцип измерения разработанного датчика позволяет пользователю получать информацию о расстоянии до поверхности любого вида с высоким осевым и поперечным разрешением. Результат измерения не зависит от параметров процесса. Измерение глубины сварки возможно для любого процесса, пока существует канал проплавления. Тем не менее, свойства канала могут оказывать воздействие на качество измерений. Поэтому разработанный датчик был протестирован в различных условиях для определения степени его функциональности. В проведенных экспериментах глубина сварки достигала 9 мм, а ее скорость 20 м/мин.

Типичным примером является сваривание внахлест неокрашенных металлических листов. Лист оцинкованной стали марки H340LAD



**Рис.1.** Результаты измерения глубины проплавления с датчика и соответствующие фотографии профилей поверхностей; пилообразный сигнал приводит к варьированию глубины проплавления в сварном шве оцинкованной стали

**Fig. 1.** Measured penetration (blue curve) and results from sections; the saw tooth led to a variation of the penetration depth in the overlap weld of galvanized steel

automated quality control of the production process is needed.

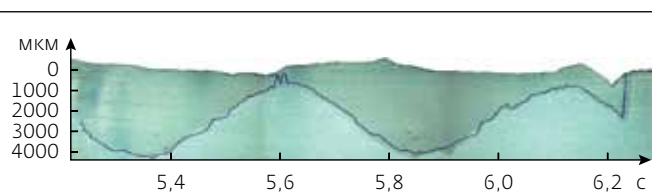
The laser welding process offers several possibilities for process monitoring systems or process control but the complexity of the laser process itself, meaning the dependence of the processing result on several process input parameters, does not facilitate their use.

As only continuous supervision of the manufacturing process can guarantee the high demands on the quality of the produced parts, process monitoring systems have become more and more standardized devices in laser applications. There is no doubt that the basis for reliable on-line process monitoring systems is the possibility to measure significant indicators, which demonstrates the instantaneous condition of the interaction zone and/or neighbouring areas.

One of the most significant pieces of information that needs to be measured in order to qualify the strength of the weld with respect to mechanical load and stress is the depth of the keyhole. There have been numerous approaches to find a sensor technology to be best placed to discover a correlation between the keyhole depth and the measured signal. These attempts have been discussed extensively in R&D and some have found their way to industrial applications. The common feature of these solutions is that they need basic understanding of the beam-material-interaction to correlate the signal with the

и боросодержащей стали марки 22MnB5, оба с толщиной 1,5 мм, разделенные зазором в 0,1-0,2 мм, сваривались со скоростью 3 м/мин с помощью волоконного лазера. Для вариации глубины проплавления производилась модуляция мощности лазера от 400 Вт до 2800 Вт. Сигнал имел пилообразную форму и частоту порядка 1,5 Гц. На рис.1 показаны три фотографии с профилями поверхностей металлических листов, а выше приведены соответствующие участки графика, полученного в режиме реального времени с датчика.

Таким образом, сигнал с датчика может быть использован для точного определения свойств процесса сварки; в случае значений, близких или ниже величины в 1,7 мм, в нижней заготовке не наблюдается проплавления. Значения от 1,7 мм до 3,1 мм свидетельствуют о проплавлении нижней заготовки, в то время как значения более 3,1 мм говорят о полном проплавлении образцов. Индикатором сквозного проплавления служит уменьшение коэффициента отражения излучения от нижней границы канала. На рис.2 показано совмещение отфильтрованного сигнала с датчика и продольного сечения шва низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм.



**Рис.2.** Участок заготовки, обработанной с помощью лазера с синусоидальной модуляцией мощности (при низкой мощности канал проплавления разрушается, что приводит к колебаниям сигнала с датчика)

**Fig. 2.** Section of a laser welded workpiece with a sine-modulated laser power. At low power, the keyhole collapses, leading to unsteady measuring signals of the penetration depth

quality criteria. These systems provide an estimate and not the actual keyhole depth.

The IDM system is able to really measure the depth of the keyhole. The technology and the comparison between existing sensor systems and application results will be content of the following article.

## RESULTS OF LABORATORY AND APPLICATION TRIALS

The basic measuring principle of the IDM sensor allows the user to measure the distance to any kind

Во время эксперимента модуляцию мощности лазера осуществляли с помощью сигнала синусоидальной формы. Небольшая разница между измеренной глубиной проплавления и поперечным сечением обусловлена расхождением между фактическим центром сварного шва и полученным сечением. Стоит отметить, что при малой глубине канал проплавления исчезает, при этом сигнал с датчика становится прерывистым. При микросварке канал проплавления отсутствует, соответственно глубина сварки не измеряется. Таким образом, датчик может быть использован только при наличии канала проплавления. В комбинации с системой мониторинга лазерной сварки существует возможность выявить небольшие отклонения от референсной глубины. Сигнал с датчика также может быть полезен для установки профиля мощности лазера в случае с варьированием таких параметров, как скорость сварки, свойства материала или изменение фокусного расстояния. Анализируя сигнал с датчика, можно вносить изменения в программу с целью получения постоянной глубины проплавления. Таким образом, пользователь получает систему обратной связи с возможностью контроля глубины сварки. Для того, чтобы доказать достоверность измерений, в Штутгартском университете были проведены испытания с одновременным получением сигнала с датчика и рентгеновских снимков. Для проведения испытаний были подготовлены передние части заготовок с толщиной в несколько миллиметров для возможности получения рентгеновских изображений. Результат испытаний состоял в получении сигналов с датчика глубины проплавления вместе с высокоскоростной видеосъемкой боковой стороны канала проплавления. Анализ съемки не только позволял выявить глубину канала, но также и флуктуации его длины, ширины и формы. На рис.3 проиллюстрирована структура сигнала с датчика и рентгеновский снимок, полученный в режиме реального времени.

Нижнюю границу канала проплавления трудно отличить от остальной части заготовки. Из-за минимального диаметра нижней границы канала контраст рентгеновского изображения достигает своего минимума. Несомненно, системы мониторинга процесса сварки, включающие датчик глубины проплавления, являются полезными составляющими в производстве, где параметры процесса сварки являются



**Рис.3.** Рентгеновский снимок канала проплавления с наложенным сигналом с датчика глубины проплавления (выполнено в Штутгартском университете)

**Fig. 3.** X-ray image of a keyhole with superimposed IDM signal (Source: IFSW Stuttgart)

of surface with a high axial and lateral resolution. Thus it is basically independent from the process parameters and can measure the welding depth of any process, as long as a keyhole is present. Nevertheless, the properties of the keyhole may have an impact on the quality of the measuring signal. Therefore the IDM is continuously tested on a variety of applications to prove its functionality. The ability to measure the depth of the keyhole was tested up to 9 mm of penetration depth and up to 20 m/min processing speed.

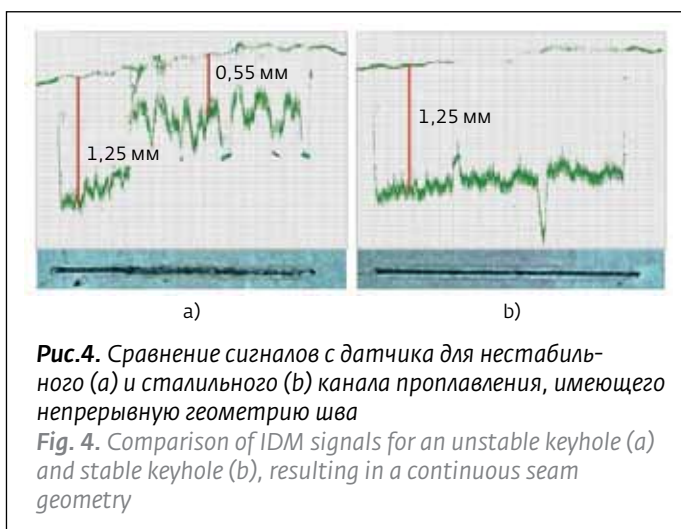
An exemplary examination is the overlap weld of metal sheets as can be found in body-in-white applications. A 1.5 mm sheet of galvanized steel H340LAD and a 1.5 mm sheet of boron steel 22MnB5, separated by a gap of 0.1–0.2 mm are welded together at 3 m/min by means of a fiber laser. In order to simulate a variation of the penetration depth, the laser power was modulated between 400 and 2800 W with a saw tooth-signal at 1.5 Hz. Fig. 1 shows three different cross sections compared with the online IDM-result. The main message is, the IDM signal can be used to accurately determine the properties of the welding process; in the case of values close or below to 1.7 mm, no keyhole is present in the lower work piece. IDM values between 1.7 and 3.1 mm prove the penetration in the lower work piece, whereas values above 3.1 mm may result from a full-penetration. In case of a through penetration, the ratio of reflected measuring light from the bottom of the keyhole decreases, further allowing the detection of the through-penetration.

Fig. 2 shows an superposition of a filtered IDM signal and a longitudinal section of a weld

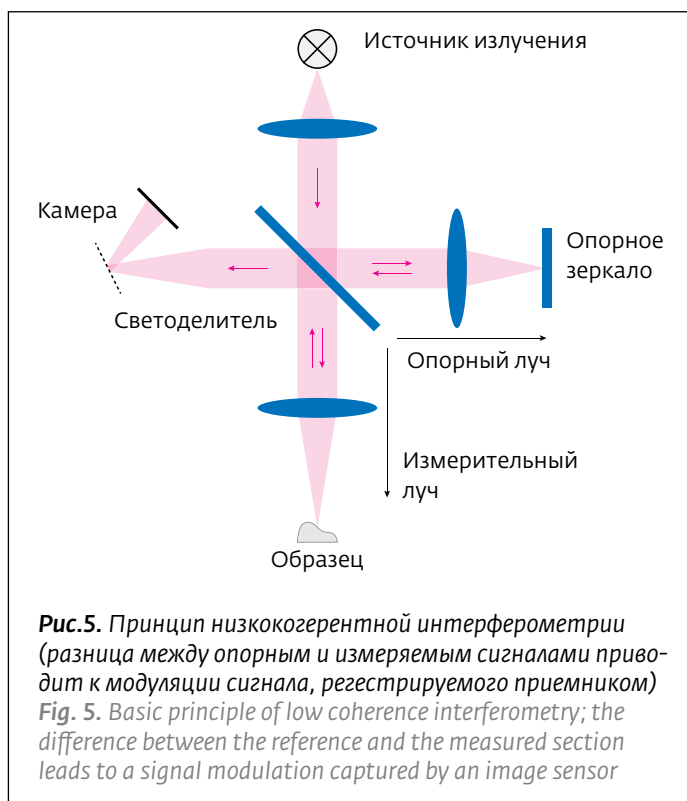
заданными величинами. На рис.4 приведено изображение сигнала с датчика для процесса сварки оцинкованной неокрашенной стали.

Процесс (a) проводился с высокими флуктуациями лазерной мощности на поверхности заготовки вследствие поглощения и рассеяния излучения на парах металла. Вследствие этого происходило изменение глубины канала, что влекло за собой ухудшение качества шва. Данные явления легко увидеть исходя из сигнала с датчика. Процесс (b) проводился с оптимизированными параметрами, что позволило получить стабильный уровень глубины проплавления. Кратковременные отклонения величины глубины проплавления от оптимального значения, зафиксированные дважды, могут теперь быть отслежены с помощью улучшенной системы мониторинга.

Область применения датчика глубины проплавления имеет широкие границы. Он может быть использован в качестве инструмента для понимания и оптимизации процесса сварки. После настройки параметров процесса сварки оптимальным образом датчик может использоваться для отслеживания глубины проплавления с высокой точностью, недоступной ранее.



in 5 mm thick mild steel. The laser power was modulated with a sinus-shaped-signal. Slight differences between the measured depth and the cross section are due to a discrepancy between the actual center of the weld and the obtained section. One can note the collapsing keyhole for very small penetration depths, leading to a non-continuous depth signal. Heat conduction welding has no keyhole and as such, the depth of the weld cannot



### АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЗА ХОДОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Принцип мониторинга за процессом сварки в режиме реального времени основывается на сборе информации о показателях, описывающих текущее состояние поверхности в зоне взаимодействия излучения с материалом и близлежащей области.

Единичный индикатор применим для мониторинга в случае, если он позволяет фиксировать значительные изменения показателей производственного процесса и соответственно качества продукции на выходе. Стоит отметить, что системы мониторинга должны работать бесконтактно, т.е. без какого-либо влияния на зону сварки. Это требование, как правило, не является проблемой в сфере лазерной обработки материалов, так как данный процесс сопровождается рядом эффектов, которые более надежно наблюдать с некоторой дистанции. Измеряемые показатели качества сварки обычно фиксируются по испускаемому из зоны обработки электромагнитному излучению, которое легко регистрируется с помощью фотодиодов или пирометров. Чтобы оценить текущее состояние процесса, сенсорная система должна быть соответствующим образом установлена и оптимизирована для каждого нового приложения. Задача по оптимизации может быть

be measured. Here again, the IDM signal can be used for accurate measurements of the keyhole depth. In combination with the Laser Welding Monitor (LWM) platform, the smallest deviations from the reference depth are detected. Another use of the IDM signal is the set-up of the laser power profile for welds with varying parameters, such as velocity, material properties or focal shift. By analyzing the IDM signal, corrections can be made on the laser program in order to obtain a constant penetration depth. The closed-loop control of the welding depth is in sight.

In order to prove the accuracy of the measurement signal, trials with simultaneous acquisition of IDM signals and X-ray images were performed at the Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) in Stuttgart. These trials consist of welding into the front side of work pieces with a thickness of only a few millimeters, in order to allow X-ray measurements. The outcome of these is a set of IDM signals paired with high-speed videos of a lateral scan of the keyhole. The analysis of these videos does not only reveal the absolute depth of the keyhole, but also its fluctuation in length, width and constancy of its shape. Fig. 3 illustrates the course of the IDM signal and the on-line X-ray measurement of the keyhole. The lower end of the keyhole is hard to distinguish from the rest of the work piece. Due to its minimal diameter at the end, the contrast of the X-ray image is reduced to a minimum.

No doubt, in-process monitoring systems as the combination of IDM and LWM are useful in production environments, where the repeatability of the welding process is given.

Fig. 4 shows the IDM-signals for a laser welding process on galvanized steel, a material typically used in body-in-white applications. The process (a) suffers of a high fluctuation of the laser power at the workpiece surface due to absorption and scattering in the metal fumes. This is why the keyhole depth is strongly varying, leading to an irregular seam quality and insufficient penetration depth. This can easily be seen in the keyhole signal. Process (b) uses an optimized set-up allowing to obtain a stable keyhole depth. Short deviations of the optimal keyhole depth, which occurs two times in this workpiece, can now be monitored.

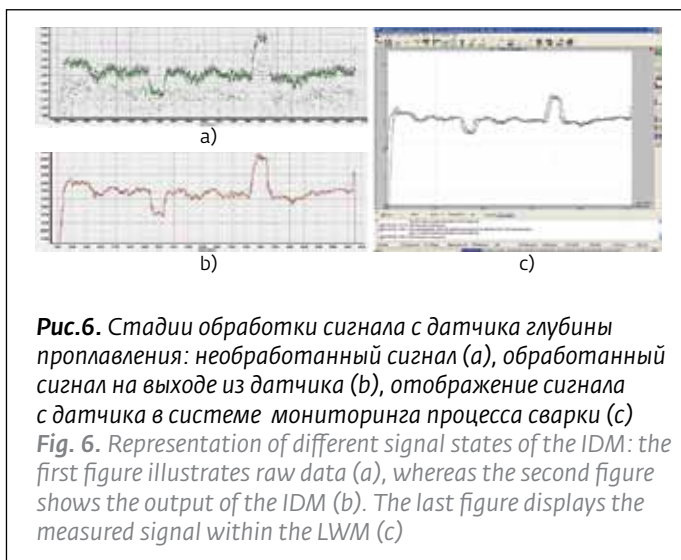
The field of application is large for the IDM sensor. It can be used as a tool to understand and optimize laser welding processes. Once the optimum process window is set-up, the IDM is used to track the keyhole depth, capable to monitor the process with an accuracy never reached before.

достигнута путем подхода на основе систематического обучения, как, например, в искусственных нейронных сетях или экспертных системах. Недостатком этого метода является то, что для каждого нового приложения настройки системы управления процессом должны быть адаптированы по временным затратам. Кроме того, такие решения являются чувствительными к изменению материала или входных параметров системы. Еще одним недочетом системы со встроенными сенсорами является то, что во многих случаях не удается найти корреляцию между интенсивностью полученного сигнала и происходящими возмущениями процесса, соответственно сделать однозначный вывод о качестве получившегося сварного шва не представляется возможным.

Эти проблемы могут быть частично решены с помощью систем формирования изображения. С помощью камеры с хорошим пространственным разрешением может осуществляться инспекция зоны взаимодействия излучения с материалом и прилегающих областей. Таким образом, осуществляется сбор дополнительной информации. В идеальном случае должна быть создана определенная инструкция и систематизация по режиму процесса. В зависимости от приложения данная информация также может быть использована для управления процессом.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ ДАТЧИКА ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ

Принцип работы датчика основывается на низкокогерентной интерферометрии (рис.5). Для медицины метод оптической когерентной томографии используется в течение многих лет. Свет с малой длиной когерентности вместе с интерферометром используется для измерения расстояния до рассеивающего материала, к примеру, человеческой ткани. В этом методе сравнивается разность фаз между опорным и измерительным лучами, как в интерферометре Майкельсона. Короткая длина когерентности достигается с использованием источников излучения с широким спектральным диапазоном. Помимо усилий в части механической и оптической интеграции элементов датчика, основой инновации является технология адаптации, информация о которой приведена ниже; точность интерферометрического измерения не зависит от электромагнитных возмущений из канала проплавления или прилегающих областей, глубины канала или изменения поверхности в результате лазерного воздействия. Только "собственный" свет, излученный низкокогерентными



**Рис.6.** Стадии обработки сигнала с датчика глубины проплавления: необработанный сигнал (а), обработанный сигнал на выходе из датчика (б), отображение сигнала с датчика в системе мониторинга процесса сварки (с)  
**Fig. 6.** Representation of different signal states of the IDM: the first figure illustrates raw data (a), whereas the second figure shows the output of the IDM (b). The last figure displays the measured signal within the LWM (c)

### PROCESS MONITORING TODAY

The principle of on-line process monitoring in laser welding is based on the acquisition of some indicators that describe the current condition of the work piece in the interaction zone and its adjacent areas.

One indicator is applicable for monitoring purposes if it is directly coupled with a significant change of the process situation and the resulting quality. Further on, process monitoring systems must operate contact-free so that there is no disturbing influence on the interaction zone. This requirement is typically not a problem in laser material processing, since this process is accompanied by a number of effects that are reliably observable from the distance.

The measured quality indicators are usually captured out of the electromagnetic radiation emitted from the processing zone and they are measured by simple photodiodes or pyrometers. To evaluate the actual condition of the process, the sensor systems must be gradually established and optimized for each new application. The optimization can be achieved through systematic learning-based approaches, such as expert systems or artificial neural networks. A disadvantage of this procedure is that for each new application the settings for an operative process monitoring system must be adapted by time-consuming, successive approximation. Furthermore, these solutions are highly sensitive to changing material or system input parameters. The deficit of the system technology based on integral measuring sensors, however, is that in many cases no clear correlation between the captured signal intensity and the existing process disturbances is given, respectively the clear inference of detected intensity and resulting weld seam property is missing.





источниками, приводит к интерференции между опорным и измерительным лучами. Таким образом, с помощью точного позиционирования измерительной точки измерение глубины канала проплавления можно производить соосно с лазерной обработкой, независимо от геометрии шва и материала. Топография поверхности может быть точно определена независимо от состояния поверхности. Единственным ограничением является размер измерительной точки по отношению к размеру пятна лазерной обработки и диапазону измерения в осевом направлении.

### ДАТЧИК ГЛУБИНЫ СВАРКИ

Разработка датчика началась с лабораторных исследований в 2007 году. Установка позволяла измерять геометрию шва через сварочную головку с фокусным расстоянием 680 мм. В последующие годы различные области применения сопоставлялись с технологическими возможностями и потребностями рынка. Задача измерять глубину проплавления возникла на раннем этапе, что отражает постоянную потребность в точных датчиках, работающих в режиме реального времени. В этой связи компания Precites анонсировала собственный датчик в 2013 году. С того времени система интегрировалась в различные приложения по лазерной сварке. Инновационная конструкция датчика, а также удобство в его эксплуатации были удостоены награды на конкурсе лазерных технологий в 2014 году. Сенсорный блок имеет возможность подключения к сварочной головке. Также предусмотрен выбор интерфейсов подключения. Подключение по протоколу RS-422 используется для передачи данных в реальном времени к датчику и от него, к примеру, к другим датчикам или контроллеру более высокого уровня. В то же время, сетевое соединение может быть использовано для подключения к компьютеру с операционной системой Windows с установленным программным обеспечением, называемым "IDM explorer". Дополнительно доступны функции триггера, синхронизации и предусмотрен аналоговый выход. Коллиматор, установленный на сварочной головке, служит для направления света в канал проплавления. Интегрированный двухкоординатный XY позиционер предусмотрен для точного попадания излучения в канал. Для того, чтобы работать с большим разнообразием полученных сигналов с датчика, предусмотрена гибкая система обработки данных. Для обработки "сырых" измерений в системе предлагается большое разнообразие фильтров, которые могут комбинироваться между

This deficit can partly be compensated with imaging sensors and camera technology. With camera-based detectors, a spatially resolved detection of the interaction zone and the adjacent areas is carried out and information about the machining process is acquired, which remains hidden from the integral sensors. Ideally a classification, and in some conditions even a deterministic statement about the process condition can be generated. Depending on the application this process information can also be used for control.

### THE IDM MEASURING PRINCIPLE

The IDM technology is an imaging method based on the low coherence interferometry (Fig. 5). In medical examinations optical coherence tomography has been established for years. The light of low coherence length with the aid of an interferometer is used for distance measurement of scattering materials like human tissue. This method compares the distance of the reflections of the measurement beam directed towards the measuring object with that of a reference beam in an interferometer, typically build as Michelson interferometer. The short coherence length is achieved by the use of light sources that emit spectrally wide light.

Besides all the effort in mechanical and optical integration of the sensor components, the real innovation achieved with the adapted technology is as follows; the accuracy of the interferometric measurement is not affected by electromagnetic emissions from the vapor capillary or their adjacent areas, neither in deep penetration welding nor during laser surface modification. Only the "own" light emitted from low coherent light sources leads to interference between the reference and the measurement path. Thus with accurate positioning of the measuring point, a measurement of the depth of the keyhole is possible coaxially to the processing laser regardless of weld geometry and material. The topography of a structured surface can be exactly determined independent of the surface condition. The only limitation is the dimension of the measurement point relative to the spot size of the laser processing and the size of the measurement range in the axial direction.

### THE IDM SENSOR

The development of the IDM sensor first started with lab-trials in the year 2007. The set-up allowed to measure seam geometries through a welding head with a focal length of 680 mm. In the years that followed, different fields of application were



собой. Все состояния сигнала могут быть визуализированы и сохранены в программе "IDM explorer". Полные возможности датчика раскрываются в совместной работе с системой мониторинга процесса сварки. Работая как обычно в комбинации с фотодиодами, к системе мониторинга можно подключить датчик глубины проплавления, что позволяет использовать тот же алгоритм обнаружения ошибок для датчика, как и для фотодиодов. Такое решение очень удобно для конечного пользователя, так как датчик полностью интегрируется в систему управления процессом сварки. Прямой доступ к датчику требуется только в ходе настройки процесса управления. После настройки система управления устанавливает единый канал обмена данными с оператором.

Процесс обнаружения ошибок основывается на сравнении измеренных и заданных параметров. Путем анализа данных с датчика возможно сделать выводы об уровне глубины проплавления. Дальнейший анализ позволяет обнаруживать неустойчивость и изменения геометрии канала проплавления. В комбинации с записью технологических выбросов, осуществляемой с помощью фотодиодов, проводится комплексный мониторинг процесса лазерной сварки. На рис.6 представлены исходные данные (точки, выделенные зеленым цветом), которые позволяют сделать вывод о незначительных флуктуациях глубины проплавления. Красная кривая является обработанным сигналом, который поступает в систему мониторинга, где он подвергается дальнейшей обработке и систематизации.

### **СВЕДЕНИЯ О КОМПАНИИ PRECITEC GmbH & Co. KG (ГАГГЕНАУ, ГЕРМАНИЯ)**

Компания специализируется на производстве систем для лазерной обработки материалов. Precitec выпускает отдельные обрабатывающие головки для последующего присоединения к ним лазера, а также системы мониторинга процесса сварки. Перед началом процесса сварки камеры с высоким разрешением определяют положение и геометрию заготовки с использованием принципа триангуляции. Анализ шкалы серых тонов позволяет переместить сварочную головку в точное положение. Датчики и камеры, работающие в режиме реального времени, предоставляют пользователю информацию о стабильности процесса сварки и дефектах сварного соединения. На завершающей стадии процесса соответствующие камеры определяют геометрию и поверхность шва.

evaluated against technological feasibility and market demands. The decision to measure the penetration depth was made at an early stage, reflecting the permanent need for more accurate in-process sensors. As such, Precitec revealed its IDM sensor in the year 2013. Since then, the system is introduced in different laser welding applications. The innovative sensor design and its usability were awarded with the second price of the Innovation Award Laser Technology 2014.

The sensor unit provides the connections to the welding head and offers a variety of interfaces. The RS422 connection is used for real-time data transmission from and to the IDM sensor, e.g. with other sensorial equipment or a higher-level controller. At the same time, the network connection can be used to connect a Windows computer running the IDM software, called IDM explorer. Additional connections are made available for trigger, synchronization and analog output of measuring results.

The collimation unit on the welding head is used to adjust the measuring light into the keyhole. The integrated x/y-displacement is required to perfectly hit the center of the keyhole.

In order to deal with the large variety of possible keyhole signals, the real-time data processing is kept flexible. Starting with the raw measurement data, different filters are offered that can be combined. All states of the signal can be visualized and saved through the IDM Explorer.

The full performance of the IDM is revealed in combination with the LWM. Ordinarily used in combination with photodiodes, the LWM can also integrate the IDM, allowing the use of the same error detection on photodiodes and the IDM. This solution offers the biggest comfort for end-users, as it completely integrates the IDM hardware into the LWM control cabinet. A direct access to the IDM sensor is only required during the set-up of the process monitoring. Once installed, the LWM remains the single interface for the PLC or the machine operator.

LWM's error detection relies on the comparison of measured data with predefined signal envelopes. By analyzing the IDM signal, too high or too low penetration depths can be detected. A further variance analysis of the penetration depth allows the detection of unstable processes or other discontinuities of the keyhole-geometry. In combination with the recorded process emissions from the photodiodes, a comprehensive in-process monitoring for laser welding applications is offered. Fig. 6 depicts the acquired raw data (green measurement points) from a process with short fluctuations of the penetration



## ВЫВОДЫ

Сам по себе датчик глубины проплавления является устройством, измеряющим дистанцию. Однако благодаря высокому пространственному и временному разрешению, а также устойчивости к технологическим выбросам, данное устройство находит применение в сложном с точки зрения внешних условий процессе лазерной обработки материалов. Измерение глубины проплавления является новшеством в сфере мониторинга технологических процессов. Наконец, оценка качества изделий, сваренных лазерным методом, основывается на измерении геометрических величин и не коррелирует с процессом излучения. В комбинации с системой мониторинга процесса сварки, датчик глубины проплавления является устройством, пригодным для производственных условий.

Данная технология приводит к модернизации датчиков, использующихся в настоящее время в сфере лазерной обработки материалов. Новые приложения, которые становятся доступными для лазерной сварки, укрепляют позиции лазера как инструмента для производства и исследований. ■

depth. The red curve is the output of the IDM sensor that is forwarded to the LWM system. Once inside the LWM, it can be further processed and used for classification.

## CONCLUSION

The IDM sensor itself is just a device to measure a distance. But due to its high spatial and temporal resolution and its robustness against process emissions, it is the perfect tool for the extremely difficult environment of laser material processing applications. The measurement of the real depth of the keyhole is a new dimension in the field of process monitoring. Finally, the quality assessment of laser welded parts is based on geometrical measurements and not a correlation between process radiation and the welding result. In combination with the LWM, the IDM is a ready to use sensor for production environments.

The technology itself also leads to a redesign of sensors currently used in the field of laser processing. New applications are made available for the laser welding process, thus strengthening the position of the laser as a tool for production and research. ■

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 2800 руб.

## СПРАВОЧНИК ПО ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Редактор оригинального издания С.Катаяма

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. –  
704 с. + 34 с. цв. вклейки  
ISBN 978-5-94836-420-9

Среди технологий, предназначенных для обработки материалов лазером, особо выделяется лазерная сварка, включившая в себя последние достижения в разработке лазерных устройств. Для ее правильного применения и использования требуется ясное понимание физических механизмов и явлений, сопровождающих лазерную сварку. Поэтому в справочнике рассмотрены разнообразные лазерные или гибридные процессы сварки, сварка различных видов материалов, приведено описание металлургических, химических и механических аспектов сварки.

Справочник разделен на четыре части. В разделе I рассмотрены базовые принципы физических процессов сварки и раскрыты причины появления дефектов. Раздел II посвящен конкретным технологиям, рассмотрена лазерная сварка различных материалов. В разделе III представлены методы численного моделирования процесса лазерной сварки, описана процедура калибровки инструментов в роботизированной сварке. В разделе IV рассмотрены конкретные значения рабочих параметров и условий сварки в промышленных применениях.

Книга адресована студентам, инженерам, ученым, преподавателям и станет важной и полезной для всех, кто интересуется лазерной сваркой – от новичков до специалистов и экспертов.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)