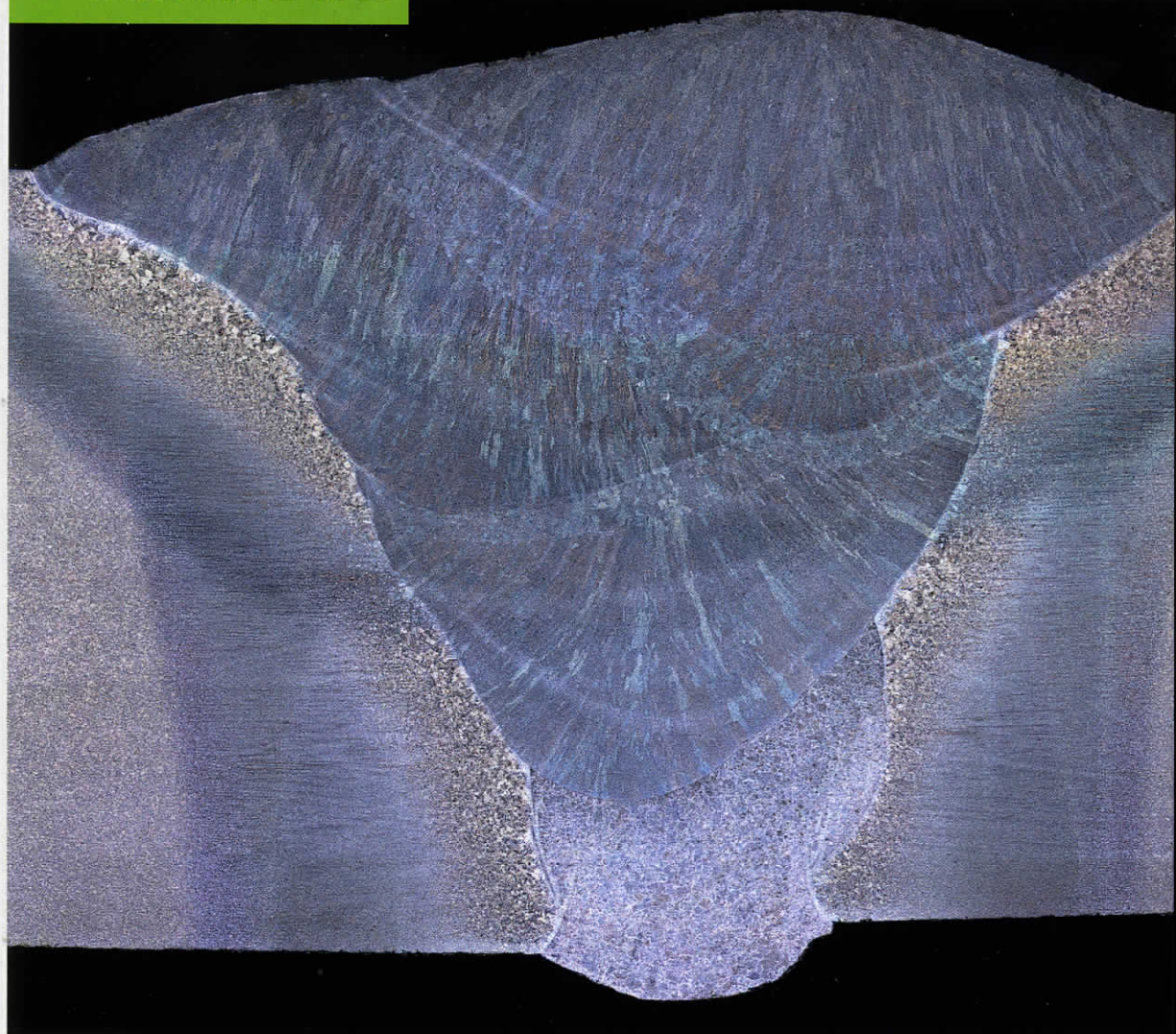


Mirosław Łomozik

**MIKROSTRUKTURY ZŁĄCZY SPAWANYCH STALI
KONSTRUKCYJNYCH ORAZ SPAWALNICZE WYKRESY
PRZEMIAN AUSTENITU CTP_{C-S}**

MONOGRAFIE nr 20



Łukasiewicz

Górnślaski Instytut Technologiczny

RECENZENCI

Prof. dr hab. inż. Janusz ADAMIEC – Politechnika Śląska
Prof. dr hab. inż. Jerzy ŁABANOWSKI – Politechnika Gdańska

RADA NAUKOWA SERII MONOGRAFIE

Prof. dr hab. inż. Rafał DAŃKO
Prof. dr hab. inż. Zbigniew GRONOSTAJSKI
Dr hab. inż. Paweł PICHNIARCZYK, prof. AGH
Prof. dr hab. Maria SOZAŃSKA
Dr hab. inż. Joanna WOJEWODA-BUDKA, prof. PAN

ISBN: 978-83-969733-0-6

Wydawca: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnśląski Instytut Technologiczny
ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

All Rights Reserved

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym również nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w postaci cyfrowej zarówno w Internecie, jak i w sieciach lokalnych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

ZESPÓŁ REDAKCYJNY

redaktor naczelny – prof. dr hab. inż. Adam ZIELIŃSKI

zastępcy redaktora naczelnego – dr hab. inż. Jarosław MARCISZ,
prof. dr hab. Józef PADUCH

redaktorzy tematyczni – dr hab. inż. Marian NIESLER, dr hab. inż. Zygmunt MIKNO,
dr hab. inż. Krzysztof RADWAŃSKI, prof. dr hab. inż. Jacek SŁANIA,
dr hab. inż. Dariusz WOŹNIAK

redaktorzy techniczni – mgr Marek DRAGAN, mgr inż. Danuta GRUSZCZYŃSKA,
mgr Joanna GUBERNAT

SPIS TREŚCI

Przedmowa	5
Podziękowania	7
ROZDZIAŁ 1	
MIKROSTRUKTURY ZŁĄCZY SPAWANYCH STALI KONSTRUKCYJNYCH	9
1.1. Wprowadzenie	9
1.2. Wpływ cykli cieplnych spawania na strukturę złączy spawanych ze stali konstrukcyjnych wykonanych metodami łukowymi	9
1.3. Ferryt Widmanstättena	22
1.3.1. Struktury Widmanstättena – rys historyczny	22
1.3.2. Mechanizm powstawania ferrytu Widmanstättena	23
1.3.3. Morfologia ferrytu Widmanstättena	28
1.3.4. Wpływ ferrytu Widmanstättena na właściwości mechaniczne stali i złączy spawanych	31
1.3.5. Zmniejszanie ilości ferrytu Widmanstättena w mikrostrukturze złączy spawanych	34
1.4. Przegląd mikrostruktur złączy spawanych metodami łukowymi	39
1.5. Podsumowanie	172
1.6. Wnioski	185
1.7. Literatura	187
ROZDZIAŁ 2	
SPAVALNICZE WYKRESY PRZEMIAN AUSTENITU CTP_C-S STALI KONSTRUKCYJNYCH	193
2.1. Wprowadzenie	193
2.2. Istota przemian austenitu w stalach w warunkach spawalniczych w porównaniu do warunków obróbki cieplnej	193

2.3. Metodyka badań przemian strukturalnych stosowana dotychczas w Instytucie Spawalnictwa, a obecnie w Łukasiewicz – Górnośląskim Instytucie Technologicznym w Gliwicach	199
2.3.1. Stanowisko badawczo-pomiarowe	202
2.3.2. Program TPF 3.0 do tworzenia wykresów CTP _{C-S}	211
2.4. Literatura	220
2.5. Atlas wykresów CTP _{C-S}	221
Stal S355JR	222
Stal P265GH	224
Stal 45	226
Stal 32HA	228
Stal 40HM	230
Stal 41Cr4	232
Stal X10CrAlSi7	234
Stal S700MC	236
Stal S960QL	238
Stal S1100QL	240
Stal S1300QL	242
Stal 16Mo3	244
Stal 25HM	246
Stal 13CrMo4-5	248
Stal 21CrMoV5.11	250
Stal 10CrMo9-10	252
Stal 7CrWVMoNb9-6 (T/P23)	254
Stal 7CrMoVTiB10-10 (T/P24)	256
Stal X10CrMoVNB9-1 (T/P91)	258
Stal X10CrWMoVNB9-2 (T/P92)	260
Stal X12CrCoWVNB12-2-2 (VM12-SHC)	262
Stal X13CrMoCoVNB9-2-1 (PB2)	264
Stal ARMSTAL 500	266
2.6. Supplement	268
Streszczenie	269
Summary	271

PRZEDMOWA

Zapotrzebowanie na wiedzę spawalniczą jest bardzo duże. Na rynku wydawniczym każdego roku pojawiają się nowe książki, monografie oraz skrypty. Publikowane są liczne artykuły naukowe i techniczne w krajowych i zagranicznych czasopismach związanych ze spawalnictwem.

Okazuje się jednak, że występuje niedosyt informacji jeśli chodzi o wydawnictwa poświęcone budowie strukturalnej złączy spawanych różnych gatunków stali konstrukcyjnych spawanych różnymi metodami. Przykładem pozycji literaturowej w tej tematyce jest książka Jerzego Łobzowskiego pt. „Metalografia stalowych złączy spawanych” z 1966 roku [1]. Obecnie takiej pozycji, która traktowałaby o współczesnych materiałach konstrukcyjnych na krajowym rynku wydawniczym nie ma.

Podobnie przedstawia się sytuacja w zakresie przemian strukturalnych austenitu w stalach konstrukcyjnych w warunkach spawalniczych.

Aktualnie na krajowym rynku wydawniczym nie ma pozycji, która prezentowałaby wyniki badań przemian strukturalnych w nowoczesnych stalach konstrukcyjnych w warunkach spawalniczych w postaci wykresów CTP_C-S . Ostatnie tego rodzaju wydawnictwo ukazało się w Polsce w roku 1983 czyli 40 lat temu i obecnie jest już niedostępne.

Stąd powstała idea opracowania monografii zatytułowanej „*Mikrostruktury złączy spawanych stali konstrukcyjnych oraz spawalnicze wykresy przemian austenitu CTP_C-S* ”.

Oddając książkę do rąk Czytelników autor ma nadzieję na jej życzliwe przyjęcie, zainteresowanie oraz na cenne uwagi, które będą mogły być w przyszłości wykorzystane. Ponadto autor ma nadzieję, że niniejsza książka będzie przydatna dla studentów inżynierii materiałowej a zwłaszcza specjalności spawalnictwo, inżynierów i technologów spawalników, inspektorów, pracowników działów kontroli jakości firm wytwarzających konstrukcje spawane, laboratoriów przemysłowych, ośrodków naukowo-badawczych, a także dla osób, które zawodowo interesują się spawalnictwem.

Mirosław Łomozik

Podziękowania

Pragnę wyrazić podziękowania wszystkim osobom, od których uzyskałem merytoryczną pomoc i dzięki którym niniejsza monografia otrzymała ostateczną formę.

Dziękuję Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za finansowanie badań prac statutowych realizowanych w ramach działalności podstawowej Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach (Id-137/2010, Da-108/2011, Hb-66/2012, Hb-73/2013 i Hb-90/2014), w ramach których powstała koncepcja i większość materiału badawczego stanowiąca zawartość niniejszej monografii.

Dziękuję Dyrekcji Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Spawalnictwa oraz Dyrekcji Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląskiego Instytutu Technologicznego w Gliwicach za życzliwość i stworzenie dogodnych warunków sprzyjających mojej pracy naukowej.

Mirosław Łomozik

2.6. SUPLEMENT

Równocześnie z tworzeniem niniejszej monografii powstał film zatytułowany „Przemiany strukturalne austenitu w stalach w warunkach spawalniczych”, który nawiązuje do drugiej części książki dotyczącej spawalniczych wykresów przemian austenitu CTP_C-S stali konstrukcyjnych.

W filmie w przystępny sposób przedstawiono potrzebę badania przemian strukturalnych austenitu w stalach w warunkach spawalniczych oraz pokazano przykłady wykorzystania wyników tych badań w życiu codziennym.

Film został zapisany na nośniku elektronicznym USB i jest dołączony do książki.

MIKROSTRUKTURY ZŁĄCZY SPAWANYCH STALI KONSTRUKCYJNYCH ORAZ SPAWALNICZE WYKRESY PRZEMIAN AUSTENITU CTP_{C-S}

Streszczenie

Bardzo obszerna tematyka nowoczesnego spawalnictwa obejmuje, obok problemów technologicznych, materiałowych i sprzętowych, zagadnień kontroli, sterowania i pomiarów, czy wreszcie zaawansowanej automatyzacji i robotyzacji, dogłębną analizę zjawisk zachodzących pod wpływem procesów spawania w materiałach spawanych, z wykorzystaniem wiedzy z zakresu metaloznawstwa i inżynierii materiałowej. Pełna informacja o przemianach i zmianach zachodzących w materiałach spawanych w trakcie spawania oraz o pozytywnych lub negatywnych skutkach tych zmian znakomicie ułatwia wybór najkorzystniejszych parametrów procesów spawania oraz parametrów ewentualnych procesów obróbek cieplnych w trakcie lub po spawaniu, wybór, który pozwala uzyskiwać optymalne struktury metalograficzne w złączach spawanych.

Monografia składa się z dwóch części (dwóch rozdziałów).

Część pierwszą poświęcono szczegółowej analizie struktur w złączach spawanych wykonanych z kilkudziesięciu stali konstrukcyjnych, spawanych różnymi metodami. Wybrano zróżnicowane stale niestopowe i stopowe, użytkowane w nowoczesnym przemyśle. Do wykonania złączy spawanych wykorzystano następujące metody spawania: ręczną gazową, ręczną elektrodami otulonymi, MAG (zwykłą i łukiem pulsującym), TIG, laserową oraz zgrzewanie iskrowe. W niektórych przypadkach stosowano obróbkę cieplną (z użyciem techniki ściągów odpuszczających). Kontrolowano precyzyjnie wszystkie parametry spawania i dokładnie określono wszystkie składniki strukturalne występujące w trzech strefach złączy spawanych: materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła (SWC) i spoinie. Składniki te zobrazowano na licznych zdjęciach fotograficznych wykonanych przy użyciu mikroskopii świetlnej.

W ten sposób powstał obszerny album struktur wzorcowych, które mogą być pomocne przy identyfikacji składników strukturalnych uzyskiwanych w praktycznych złączach spawanych, na przykład w zakładach przemysłowych.

Ponadto w części pierwszej monografii znalazł się obszerny punkt poświęcony problematyce ferrytu Widmanstättena. Przedstawiono mechanizm powstawania tego ferrytu oraz scharakteryzowano jego morfologię. Następnie opisano wpływ ferrytu Widmanstättena na właściwości mechaniczne stali i złączy spawanych oraz przedstawiono sposób zmniejszania ilości tego ferrytu w mikrostrukturze złączy spawanych.

Część druga monografii dotyczy badań przemian austenitu w stalach, w warunkach spawalniczych. Jest to ważna problematyka ponieważ literatura dostarcza w dużej obfitości informacji o przemianach austenitu w warunkach tradycyjnych obróbek cieplnych (wykresy CTP oraz CTP_C), natomiast parametry przemian w warunkach spawalniczych są zdecydowanie odmien-

ne. W przeszłości wykresami przemian austenitu w warunkach spawalniczych CTP_C-S zajmowali się nieliczni badacze w świecie. Wśród nich byli również pracownicy ówczesnego Instytutu Spawalnictwa. Z braku odpowiednich urządzeń wyniki badań były jednak skromne, podobnie było z publikacjami.

Aktualnie na krajowym rynku wydawniczym nie ma pozycji, która prezentowałaby wyniki badań przemian strukturalnych w nowoczesnych stalach konstrukcyjnych w warunkach spawalniczych w postaci wykresów CTP_C-S. Ostatnie tego rodzaju wydawnictwo ukazało się w Polsce w 1983 roku i obecnie jest już niedostępne. Fakt ten skłonił Autora do opracowania niniejszej monografii.

Autor monografii podjął przed kilku laty zadanie zbudowania nowego, bardzo nowoczesnego urządzenia do wyznaczania spawalniczych wykresów przemian austenitu w stalach. Korzystając z najnowszych osiągnięć współczesnej techniki, urządzeń komputerowych i możliwości programów informatycznych doprowadził, z pomocą niewielkiego zespołu dobranych specjalistów, do zrealizowania swojego zamierzenia. Prace projektowe i wykonawcze były wspomagane projektem badawczym finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, natomiast na gotowe urządzenie udzielony został na rzecz Instytutu Spawalnictwa patent.

W monografii opisano dokładnie wykonane urządzenie wraz z wyposażeniem dodatkowym. Podczas badania przemian strukturalnych bardzo istotną czynnością jest mocowanie do próbek złączy termoparowych typu powierzchniowego. W tym celu opracowano i wykonano w Instytucie Spawalnictwa specjalizowaną mikro zgrzewarkę rezystancyjną ze sterownikiem inwertorowym. Oprócz urządzenia badawczego powstało również oprogramowanie kontrolne, sterujące i pomiarowe pozwalające na precyzyjne prowadzenie badań przemian strukturalnych i wyznaczanie wykresów CTP_C-S, a równocześnie na archiwizowanie wyników badań.

Jedną z najważniejszych części monografii jest punkt 2.5 „Atlas wykresów CTP_C-S”. W punkcie tym zamieszczono wykresy przemian austenitu sporządzone w układzie półlogarytmicznym: temperatura – czas chłodzenia $t_{8/5}$ i fotografie mikrostruktur dwudziestu trzech stali konstrukcyjnych różniących się: gatunkami, składami chemicznymi, właściwościami oraz mikrostrukturami w stanie wyjściowym.

Materiał przedstawiony w monografii oparty został na dostępnej aktualnej literaturze krajowej i światowej, ale przede wszystkim na obszernych doświadczeniach własnych i wiedzy Autora.

Monografia powinna dobrze służyć szerokiej rzeszy badaczy i praktyków w zgłębianiu bogatej problematyki metaloznawstwa spawalniczego. Autor ma nadzieję, że monografia będzie przydatna dla studentów inżynierii materiałowej a zwłaszcza specjalności spawalnictwo, inżynierów i technologów spawalników, projektantów konstrukcji spawanych, inspektorów oraz pracowników działów kontroli jakości firm wytwarzających konstrukcje spawane.

MICROSTRUCTURES OF WELDED JOINTS MADE OF STRUCTURAL STEELS AND CURVES OF AUSTENITE TRANSFORMATIONS UNDER WELDING CONDITIONS (CCT-W)

Summary

In addition to issues concerning technology, materials, equipment, monitoring, control and, last but not least, advanced automation and robotisation, the vast subject area of technologically advanced welding engineering includes the in-depth analysis of phenomena triggered in materials by welding processes and involves, to some extent, knowledge related to metallurgy and materials engineering. Thorough knowledge regarding changes and transformations taking place in materials subjected to welding as well as knowledge concerning positive or negative results of such changes greatly facilitate the adjustment of the most favourable welding process parameters and parameters of heat treatment (if any) applied during or after welding processes and enabling the obtainment of optimum metallographic structures in welded joints.

The monograph is composed of two parts (chapters).

The first part is concerned with the detailed analysis of structures in joints made of various structural steels (e.g. unalloyed steels, alloy steels and steels used in advanced industries), welded using various methods (e.g. manual gas welding, manual metal arc welding, MAG (conventional and pulsed arc) welding, TIG welding, laser beam welding and flash welding). In some cases it was necessary to apply heat treatment (temper bead technique). The study involved the precise control of all welding parameters and the meticulous identification of all structural constituents present in the three zones of welded joints, i.e. the base material, heat affected zone (HAZ) and the weld. The above-named constituents were presented in numerous photographs obtained using light microscopy.

All the aforementioned activities resulted in the formation of an extensive album of model structures facilitating the identification of structural constituents obtained in actual welded joints, e.g. in industrial plants.

The first part of the monograph also contains a substantial section concerning Widmanstätten ferrite, including the presentation of the mechanism responsible for the formation of the ferrite and the description of its morphology. In addition, the section also discusses the effect of Widmanstätten ferrite on mechanical properties of steels and welded joints as well as presents a method reducing the amount of such ferrite in the microstructure of welded joints.

The second part of the monograph concerns austenite transformations in steels under welding conditions. This area of expertise is crucial as vari-

ous scientific publications provide a lot of information related to austenite transformations under conventional heat treatment conditions (TTT or CCT curves), yet parameters of transformations under welding conditions are of entirely different nature. In the past, issues concerning the development of curves presenting austenite transformations under welding conditions (CCT diagrams for welding conditions (CCT-W)) have been addressed by very few researchers in the world. This small group of scientists included research workers of the then Institute of Welding. However, the lack of appropriate equipment translated into the very limited outcome of research and a small number of research-related publications.

Presently, among available scientific publications there are no works presenting results of tests concerning structural transformations taking place in advanced steels under welding conditions, i.e. CCT diagrams for welding conditions (CCT-W). The latest, and currently unavailable, study related to the above-named subject was published in Poland in 1983. The aforesaid fact, among other things, inspired the Author's attempt to develop the monograph.

Several years ago, the Author of the monograph undertook to build a new state-of-the-art device enabling the plotting of curves presenting austenite transformations in steels under welding conditions. Through his collaboration with a small team of carefully selected specialists and by making use of the latest achievements in technology, computer equipment and IT software programmes, the Author succeeded in accomplishing the aforesaid goal. The research-related design and implementation works were supported within a research project financed by the National Centre for Research and Development. In addition, the Polish Patent Office granted the Institute of Welding with a patent for a device developed within the monograph-related research work.

The monograph contains the accurate description of the device along with accessory equipment. One of the most important activities performed during tests of structural transformations involved the welding of surface-type thermocouples to test specimens. To this end, Institute's specialists developed and built a special resistance microwelding machine with an inverter controller. The researchers also developed a control-measurement software programme enabling the performance of precise tests concerning structural transformations, the plotting of CCT curves for welding conditions as well as recording and archiving related test results.

One of the most important sub-paragraphs of the publication, i.e. 2.5 "Atlas of CCT curves for welding conditions", includes curves of austenite transformations developed in a semi-logarithmic system, i.e. temperature – cooling time $t_{8/5}$, and microstructural photographs of twenty three various steel grades having different chemical compositions, properties and microstructures at the initial state.

The research material presented in the monograph is based on reference publications currently available in Poland and worldwide, but, first and foremost, on Author's vast knowledge and multi-annual experience.

The monograph should help a large number of researchers and practitioners explore many and varied issues of welding-related metallurgy. The Author also hopes that the monograph will prove very useful not only for students majoring in material engineering and, particularly, in welding engineering but also for welding engineers and technologists, design engineers of welded structures, inspectors and specialists employed in quality control departments of companies fabricating welded structures.



Od 1985 roku dr hab. inż. Mirosław Łomozik jest związany zawodowo z Firmą, która na przestrzeni lat ulegała transformacji. Najpierw był pracownikiem Zakładu Badań Spawalności i Konstrukcji Spawanych Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. Od 1 kwietnia 2019 roku Instytut Spawalnictwa stał się częścią Sieci Badawczej Łukasiewicz, a 1 stycznia 2023 roku powstał Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny (Łukasiewicz – GIT).

W nowej strukturze organizacyjnej Łukasiewicz – GIT dotychczasowy Instytut Spawalnictwa funkcjonuje jako Centrum Spawalnictwa, a dr hab. inż. Mirosław Łomozik jest obecnie pracownikiem Grupy Badawczej Spawalność i Konstrukcje Spawane w tym Centrum.

Jest specjalistą w zakresie inżynierii spajania, metaloznawstwa spawalniczego, spawalności metali oraz

przemian fazowych w stopach żelaza z węglem.

Dr hab. inż. Mirosław Łomozik posiada m.in. Certyfikat Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika, Certyfikat firmy Buehler w zakresie preparatyki materiałów do badań strukturalnych w oparciu o mikroskopię świetlną oraz Certyfikat Kompetencji w zakresie badań nieniszczących VT – stopień kwalifikacji 2.

Jest autorem i współautorem 8 książek i monografii. W swoim dorobku publikacyjnym, jako autor i współautor, posiada około 110 publikacji w specjalistycznych czasopismach i periodykach technicznych, w tym 15 w bazie JCR (Journal Citation Reports) (czasopisma posiadające impact factor).

Jest autorem i współautorem 4 patentów.

Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Mikroskopii (PTMi), European Microscopy Society (EMS), International Federation of Societies for Microscopy (IFSM) oraz Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego.

Dr hab. inż. Mirosław Łomozik jest laureatem Medalu im. Stanisława Olszewskiego. Medal ten jest przyznawany przez Sekcję Spawalniczą Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP) najwybitniejszym polskim i zagranicznym spawalnikom w uznaniu ich zasług dla spawalnictwa.

www.git.lukasiewicz.gov.pl

ISBN 978-83-969733-0-6