

Piotr ZYZAK¹, Piotr SZCZYGIEŁ²

Opiekun naukowy: Piotr ZYZAK¹

PROBLEMATYKA ZNAKOWANIA LASEROWEGO KODÓW NA ELEMENTACH CZĘŚCI MASZYN

Streszczenie: Artykuł przedstawia sposób doświadczalnej oceny dokładności kodu DataMatrix wykonanego techniką znakowania laserowego, za pomocą lasera znakującego TRUMPF VectorMark Compact VMC3 w zależności od przyjętych parametrów pracy lasera. Przedstawiono rezultaty uzyskane z analizy obrazów wykonanego kodu za pomocą specjalistycznego oprogramowania. Zaprezentowana metodyka umożliwiła w odniesieniu do skali dokładności ocen ISO bezpośredniego laserowego znakowania produktu weryfikację końcową wykonanego kodu DataMatrix.

Słowa kluczowe: obróbka laserowa, kod DataMatrix

PROBLEMS OF LASER MARKING OF CODES ON MACHINE PARTS ELEMENTS

Summary: The article presents the method of experimental evaluation of the accuracy of the DataMatrix code made with the use of the laser marking technique, using the TRUMPF VectorMark Compact VMC3 marking laser, depending on the adopted laser operating parameters. The results obtained from the analysis of images of the code executed with the use of specialized software are presented. The presented methodology allowed for the final verification of the performed DataMatrix code with regard to the accuracy scale of ISO ratings of direct laser marking of the product.

Keywords: laser processing, DataMatrix code

1. Wprowadzenie

Podczas gdy zapotrzebowanie na mniejsze i cieńsze produkty oraz bardziej szczegółową identyfikowalność wciąż rośnie, rośnie potrzeba umieszczenia większej ilości informacji w ograniczonej przestrzeni na wytwarzanych produktach. W tym

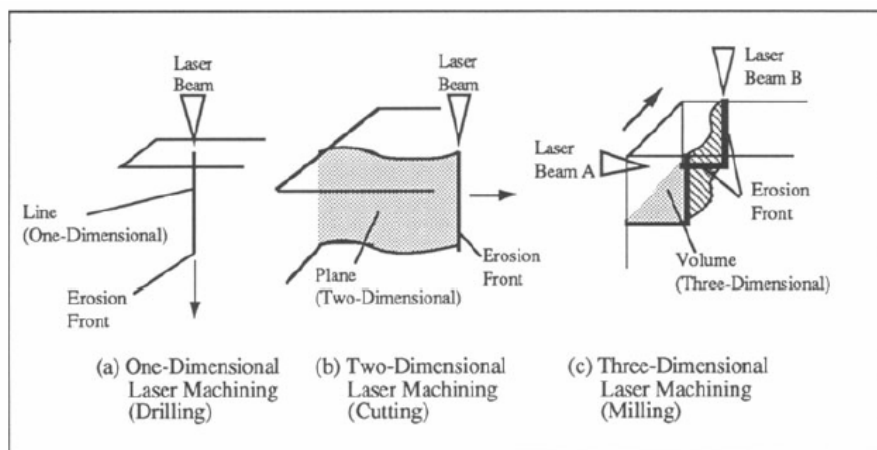
¹ dr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, przyzak@ath.bielsko.pl

² Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Automatyka Przemysłowa, pszczygiel94@gmail.com

celu wykonuje się m. in. kody matrycowe, które należą do kodów 2D i mogą zawierać dziesiątki, a nawet setki razy więcej informacji niż kod kreskowy. Ta wysoka gęstość informacji pozwala na przechowywanie w kodzie 2D takiej samej ilości informacji, jak kod kreskowy, w zaledwie 1/30 wielkości. Korzystanie z kodów 2D upraszcza zarządzanie, poprawia dokładność i skraca czas pracy. Pełna identyfikowalność części jest podstawowym elementem zapewniającym zgodność z normami jakości ISO. Identyfikowalność zaczyna się od znakowania części, a wybór technologii znakowania laserowego pozwala producentom zautomatyzować operacje znakowania i zapewnić wysoki poziom kontroli. Stąd też stale wzrasta liczba kodów 2D bezpośrednio oznaczonych znacznikiem laserowym. W związku z tym wymagane jest znakowanie wysokiej jakości, aby zapewnić stabilny odczyt kodu 2D.

Obróbka laserowa może zastępować mechaniczne metody usuwania materiału, szczególnie w przypadku elementów trudnoobrabialnych, wytworzonych na przykład z utwardzonych metali, ceramiki czy kompozytów. Wprowadza ona również nowe możliwości technologiczne obróbki [7÷9], ze względu na swoje specyficzne właściwości. Obróbka laserowa jest procesem termicznym. Jej skuteczność zależy głównie od właściwości termicznych i optycznych, a zdecydowanie mniej od właściwości mechanicznych obrabianego przedmiotu. Obróbka laserowa jest procesem bezdotykowym. Przekazywanie energii pomiędzy urządzeniem a materiałem następuje w wyniku promieniowania. Laser nie wywiera nacisku na obrabiany przedmiot, a zatem nie występują drgania, jak może to mieć miejsce w przypadku obróbki skrawaniem.

Obróbka laserowa [1, 5] może być wykorzystywana do realizowania różnorodnych operacji, na przykład do wykonywania otworów, cięcia, rowkowania czy spawania. Usunięcie materiału najczęściej następuje w wyniku jego stopienia lub wyparowania. Oznacza to zmianę stanu skupienia obrabianego materiału, co wpływa na znacznie większe zużycie energii i czasu, niż w przypadku zastosowania konwencjonalnych metod obróbki [2, 12, 13]. Ogólnie, obróbkę laserową można podzielić na jedno, dwu i trójwymiarową, co przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Obróbka laserowa jako proces: a) jedno, b) dwu i c) trójwymiarowy [2]

Sam laser może być rozpatrywany jako jednowymiarowe źródło ciepła, o grubości linii równej średnicy wiązki światła. W przypadku obróbki jednowymiarowej, wiązka lasera usytuowana jest nieruchomo, względem obrabianego przedmiotu, możliwe jest więc wykonywanie otworów. W przypadku obróbki dwuwymiarowej [18], wiązka lasera przemieszcza się względem obrabianego przedmiotu, prostopadłe do jego powierzchni, umożliwiając cięcie materiału.

W przypadku obróbki trójwymiarowej [17], jednocześnie wykorzystywane są przynajmniej dwie wiązki lasera i każda z nich przemieszcza się względem obrabianej powierzchni. W miejscu przecięcia się obu wiązek, zostaje odcięty pewien fragment materiału. O obróbce trójwymiarowej można też mówić w sytuacji, gdy jedna wiązka lasera przemieszczana jest po płaszczyźnie prostopadłej, do kierunku jej strumienia, umożliwiając na przykład znakowanie powierzchni.

Wprowadzenie procesu obróbki laserowej wymaga powiązania ze sobą komponentów optycznych, elektrycznych i mechanicznych, które w efekcie utworzą system obróbczy. Taki system zwykle składa się z czterech podsystemów:

- przygotowania wiązki lasera,
- toru optycznego wiązki laserowej,
- pozycjonowania detalu,
- urządzeń pomocniczych.

Tor optyczny wiązki laserowej składa się głównie z komponentów optycznych, które umożliwiają skierowanie skupionego strumienia światła, na powierzchnię detalu. Głównymi elementami tego podsystemu są polaryzatory wiązki, zwierciadła, rozdzielacze wiązki, soczewki skupiające i przewody światłowodowe [3, 4, 10].

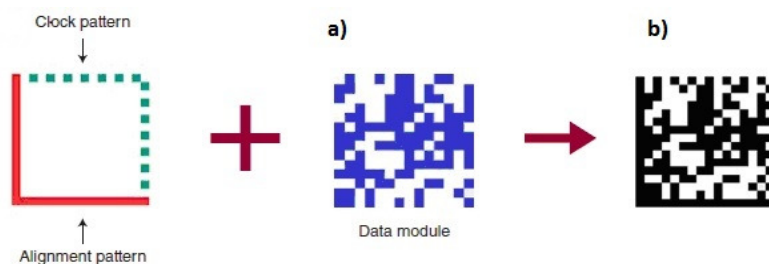
Do podstawowych elementów urządzeń laserowych można zaliczyć: ośrodek wzmacniający, układ pompujący i rezonator.

Rezonator może występować jako stabilny lub niestabilny, liniowy lub pierścieniowy. Układ pompowania może wykorzystywać zjawisko przepływu prądu, naświetlanie fotonami, reakcje chemiczne i inne. Ośrodki wzmacniające ze względu na swój stan skupienia, mogą być stałe, cieczowe lub gazowe. Istnieje wiele możliwości konfiguracji systemów lasera, dlatego optymalny wybór poszczególnych elementów składowych, zależy od konkretnego przemysłowego zastosowania [3].

Najczęściej stosowanym kryterium podziału laserów jest stan skupienia ośrodka wzmacniającego. Na podstawie takiego kryterium, lasery można podzielić na gazowe, cieczowe, stałe i półprzewodnikowe. Pomimo, że półprzewodnik jest ciałem stałym, to lasery go wykorzystujące charakteryzują się na tyle specyficznymi właściwościami, że przyjęło się przedstawianie ich jako osobną kategorię. Takie podejście do kategoryzacji umożliwia użytkownikom i konstruktorom usystematyzowanie wiedzy, na temat pewnych ogólnych cech laserów i sprawne zawężenie grupy produktów, mogących nadawać się do zastosowania w konkretnej aplikacji [3].

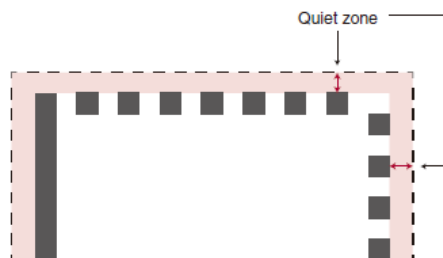
2. Problematyka związana z nanoszeniem laserowym kodu DataMatrix

DataMatrix [6, 10, 11] składa się z dwóch oddzielnych części, przedstawionych na rysunku 2: ze wzoru wyszukiwania, który służy do zlokalizowania i zorientowania kodu przez czytnik oraz z zakodowanych danych.



Rysunek 2. DataMatrix : a) wzór wyszukiwania b) zakodowane dane [18]

Wzór wyszukiwania definiuje kształt, wymiary gabarytowe, rozmiar pojedynczego pola (X-dimension) oraz ilość wierszy i kolumn kodu. Fragment przypominający kształtem literę „L” (L finder pattern) (rys. 2), pozwala na określenie rozmiaru, orientacji i ewentualnych zniekształceń symbolu. Pozostałe dwie strony wzoru wyszukiwania, stanowiące ścieżkę zegarową (clock pattern) składają się naprzemiennie z pól czarnych i białych. Ten fragment definiuje podstawową strukturę symbolu, może być także pomocny, przy określaniu jego rozmiaru i zniekształceń. Podobnie jak w przypadku kodów kreskowych, DataMatrix wymaga obecności tzw. cichej strefy (quiet zone), której przykład przedstawiono na rysunku 3. Jest to jasny obszar otaczający kod, który nie może zawierać jakichkolwiek elementów graficznych, mogących zaburzyć proces odczytu kodu. Jego szerokość powinna być równa przynajmniej szerokości pojedynczej komórki.



Rysunek 3. Cicha strefa kodu DataMatrix [18]

Kod DataMatrix może występować w formie kwadratu lub prostokąta, jak to przedstawiono na rysunku 4. Wybór odpowiedniego kształtu można uzasadnić ilością dostępnego miejsca na detalu, lokalizacją znakownika, ilością kodowanych znaków, itp.



Rysunek 4. Kod DataMatrix w formie kwadratu i prostokąta [17]

Forma kwadratowa jest najczęściej stosowana i umożliwia zakodowanie największej ilości danych, zgodnie z normą ISO/IEC 16022. Information technology – Automatic Identification and data capture techniques – Data Matrix barcode symbology specification [15].

Forma prostokątna, ze względu na swoją mniejszą wysokość, jest raczej stosowana w przypadku wykonywania oznaczeń na elementach szybko poruszających się, oraz na nietypowych, wąskich powierzchniach.

Symbol DataMatrix może zostać zakodowany za pomocą różnych struktur, takich jak: ASCII, ISO/IEC 646, C40, Text, X12, EDIFACT czy Base 256. Umożliwiają one efektywne wykorzystanie przestrzeni kodu DataMatrix. Ze wskazanych powyżej struktur, zalecane jest korzystanie ze zbioru ISO/IEC 646, który jest odpowiednikiem ASCII 256. Umożliwia on przechowywanie znaków alfanumerycznych w postaci binarnej (wykorzystując 8 bitów). Pomimo, że współcześnie kod ASCII obsługuje znaki specjalne, to nie używa się ich w symbolach DataMatrix. Jednym z powodów jest fakt, że ten sam numer kodu ASCII może być przypisany do różnego znaku specjalnego, w zależności od regionu świata [17].

Norma ISO/IEC 15415. Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Bar code symbol print quality test specification — Two-dimensional symbols [14] zawiera wytyczne dotyczące pomiaru oceny jakości kodów dwuwymiarowych, oraz przykłady i powody zdarzających się nieprawidłowości. W normie ISO/IEC 16022. Information technology – Automatic Identification and data capture techniques – Data Matrix barcode symbology specification [15] zawarto szczegółowe wytyczne związane z użytkowaniem kodu DataMatrix, w tym sposób kodowania informacji, dopuszczalne wymiary, zasady korekcji błędów, wymagania jakościowe, sposób odczytywania informacji oraz inne parametry kodu DataMatrix, które mogą być dostosowane przez użytkownika.

Obecnie stosowane są dwa rodzaje kodu DataMatrix – zgodny ze standardem ECC 200 oraz z systemem GS1. Ten pierwszy jest podstawowym rodzajem kodu, w którym można przechowywać dowolnie skonstruowane dane. System GS1 to w praktyce kod ECC 200, w którym na pierwszej pozycji umieszczono znak kodujący: FNC1. Obecność tego znaku jest rozpoznawana przez skaner. System GS1 stanowi uporządkowany zbiór informacji zawartych w kodzie, takich jak oznaczenie produktu, numer seryjny czy jego data ważności. Ma on zastosowanie w przypadku automatyzacji produkcji, dystrybucji czy korzystania z produktów, na przykład w szpitalach.

2.1. Odczytywanie i dekodowanie danych DataMatrix

Po naniesieniu kodu, jego zawartość można odczytać za pomocą urządzeń skanujących. Ten proces zawiera w sobie dwa działania: wykonanie skanu obszaru zawierającego kod oraz przetworzenie przechwyconego obrazu, w celu zdekodowania zawartych w nim informacji.

Proces odczytu kodu DataMatrix jest podobny do kodów kreskowych, ale ze względu na jego dwuwymiarowy charakter, konieczne jest wykorzystanie kamery lub urządzeń z matrycą CCD (Charge-Coupled Device).

W pierwszej kolejności przechwytywany jest obraz zawierający kod. Następnie korzystając z wzoru wyszukiwania, tworzony jest wirtualny obraz matrycy. Zazwyczaj każde z ciemnych i jasnych pól zostaje przetworzone do postaci binarnej:

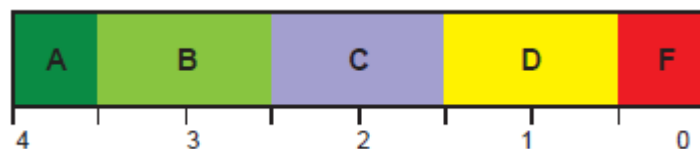
1 lub 0. W przypadku kodów kreskowych, do ich odczytu wystarczająca jest pojedyncza wiązka lasera, pokrywająca całą jego szerokość. W przypadku kodu DataMatrix, wymagany jest odczyt obrazu wzdłuż dwóch osi.

Jakość obrazu otrzymanego przy pomocy kamery zależy od kilku czynników. Jednym z nich jest liczba pikseli - im jest ich więcej, tym lepiej odwzorowany zostanie obraz. Kolejnym czynnikiem jest optyka skanera – różne soczewki są przystosowane do odczytywania kodów z różnej odległości. Ogólnie, mniejsze kody łatwiej odczytać z bliższa, a większe kody, z dalsza. Również istotnym czynnikiem jest głębia ostrości kamery, czyli zakres odległości, dla którego obraz kamery jest wyraźny, przy danym ustawieniu ostrości.

2.2. Ocena stopnia jakości kodu DataMatrix

Ocena stopnia jakości kodu DataMatrix jest pełnowartościowa tylko wówczas, gdy zostanie zestawiona z pewnymi parametrami środowiskowymi pomiaru, jak: przysłona optyki skanera (aperture), natężenie światła, czy kąt, pod jakim ustawione zostało źródło światła, względem kodu.

Zgodnie z normą ISO/IEC 15415 [14], do oceny jakości kodu DataMatrix stosuje się skalę numeryczną (wartość 4 oznacza najlepszą jakość, a 0 – najgorszą). Bazuje ona na metodologii przedstawionej w normie ANSI (American National Standards Institute), przy czym ta pierwotna skala składała się z liter A-F (A – najlepsza jakość, F – najgorsza). Powiązanie pomiędzy tymi dwiema skalami, przedstawia rysunek 5.



Rysunek 5. Skala numeryczna i literowa oceny jakości kodu DataMatrix [17]

Jakość kodu DataMatrix może być klasyfikowana pod wieloma względami. Ocena końcowa jest równa najgorszej z ocen poszczególnych parametrów. Zgodnie ze skalą ocen ISO (International Organization for Standardization), ocenie poddaje się następujące parametry: dekodowanie, kontrast, nierównomierność osiową, modulację, nierównomierność siatkową, niewykorzystaną korekcję błędów, ubytki części stałej oraz przerost wydruku.

3. Doświadczalna ocena dokładności nanoszenia kodu DataMatrix

3.1. Stanowisko lasera znakującego

Do badań wykorzystano laser znakujący TRUMPF VectorMark Compact VMC3, o następujących parametrach [16]: pobór prądu 1,3 kW, napięcie zasilania 230 V, moc lasera ≤ 30 W (w wyniku zużycia, rzeczywista moc lasera wynosiła niecałe 9 W), moc szczytowa ≤ 200 kW, czas trwania impulsu ≤ 100 ns, częstotliwość impulsów ≤ 60 kHz, odległość ogniskowa optyki 163 mm, obszar roboczy 110x110mm. Ośrodkiem czynnym dla wiązki optycznej jest granat itrowo aluminiowy z domieszką

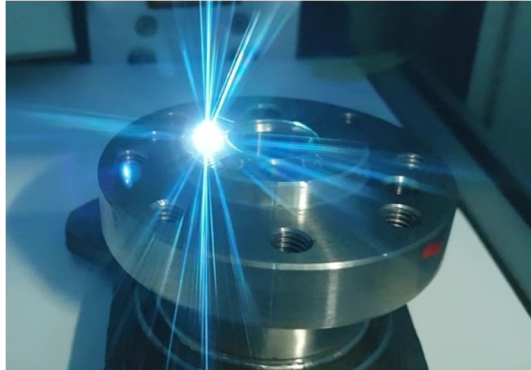
neodymu – Nd:YAG (neodymium-doped yttrium-aluminium garnet). Widok stanowiska znakowania laserowego przedstawiono na rysunku 6.



Rysunek 6. Stanowisko znakowania laserowego [19]

3.2. Metodyka badań

Laser znakujący, wykorzystany do przygotowania stanowiska badawczego, służył do nanoszenia dwuwymiarowego kodu DataMatrix, na powierzchnię wału korbowego silnika spalinowego. Badania obejmowały ocenę dokładności i czytelności wykonanego kodu na takiej samej powierzchni, dla różnych parametrów znakowania laserowego. Do oceny czytelności kodu wykorzystano system wizyjny, składający się z kamery HawkEye 1525HD oraz oprogramowania zawierającego algorytmy, umożliwiające ocenę poszczególnych parametrów skanowanego symbolu. Badania wykonywane były dla kodu DataMatrix o stałej zawartości, będącej przykładem rzeczywistego zastosowania podczas procesu produkcyjnego. Symbol składał się z 38 znaków alfanumerycznych, tworzących kod o wymiarach 22x22 (wierszy/kolumn). Na powierzchni detalu, kod był kwadratem, o szerokości około 8,6 mm. W pierwszej kolejności przeprowadzono szereg prób, w celu ustawienia detalu, w odpowiedniej odległości od optyki lasera. Następnie nanoszono kody, z przyjętymi parametrami obróbki, takimi jak częstotliwość impulsów i prędkość liniowego przemieszczania się wiązki światła. Rysunek 7 przedstawia przykładowy detal, w trakcie procesu znakowania laserowego.



Rysunek 7. Część w trakcie znakowania laserowego [19]

Każdy z wykonanych kodów DataMatrix poddano odczytowi, za pomocą kamery HawkEye 1525HD. Zawiera ona oświetlacz pierścieniowy, wykorzystujący technikę ciemnego pola (dark-field), które uwydatnia krawędzie powierzchni. Zarówno kamera jak i oświetlacz, były ustawione prostopadle względem rozpoznawanego kodu.

Do oceny jakości wykonanych kodów DataMatrix, wykorzystano mikroskop Keyence VHX-1000, przedstawiony na rysunku 8, wyposażony w optykę o maksymalnie 200-krotnym powiększeniu.



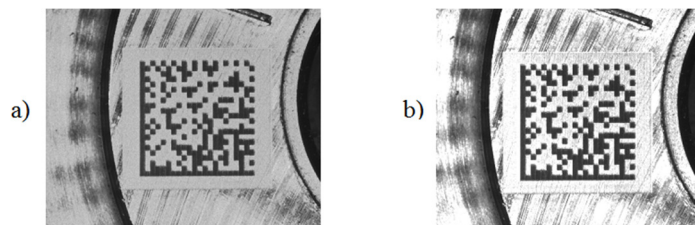
Rysunek 8. Stanowisko mikroskopu Keyence VHX-1000 do oceny jakości kodów DataMatrix [19]

Wybrany do analizy kod DataMatrix, został wykonany z następującymi parametrami znakowania laserowego: częstotliwość impulsów - dla kodu 32000 Hz oraz dla tła kodu 35000 Hz, natomiast prędkość liniowa przemieszczania się wiązki światła lasera - dla kodu 100 mm/s oraz dla tła kodu 1000 mm/s . Czas znakowania wyniósł 8,6s. Element z wykonanym kodem DataMatrix przedstawiono na rysunku 9.



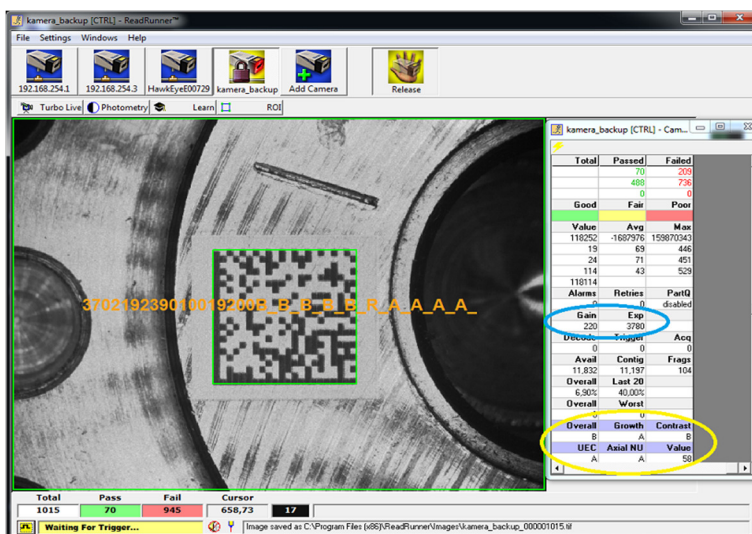
Rysunek 9. Element z wykonanym kodem DataMatrix (obszar zaznaczony żółtą obwódką) [19]

Przeprowadzono po dwa odczyty kodu, z użyciem różnych nastaw kamery. W pierwszym przypadku, parametry odczytu zostały dobrane automatycznie: ekspozycja 3780 μ s, wzmocnienie 220. W drugim przypadku, wykorzystano parametry: ekspozycja 2577 μ s, wzmocnienie 302. W efekcie uzyskano obrazy, przedstawione na rysunku 10.

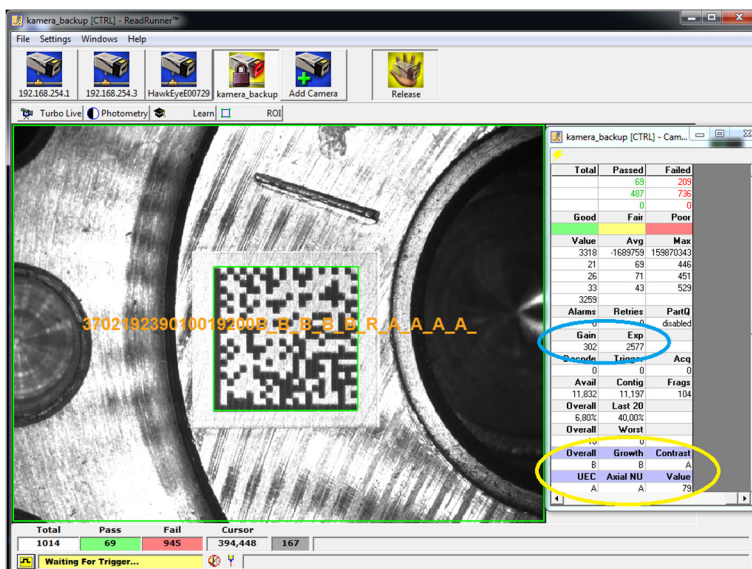


Rysunek 10. Obraz z kamery HawkEye 1525HD dla odczytu z: a) ekspozycją 3780 μ s, wzmocnieniem 220; b) ekspozycją 2577 μ s, wzmocnieniem 302 [19]

Szczegóły rozpoznanego kodu dla pierwszego odczytu przedstawia rysunek 11, a drugiego – rysunek 12. Tekst obecny na środku okna programu to rozpoznana zawartość symbolu DataMatrix.



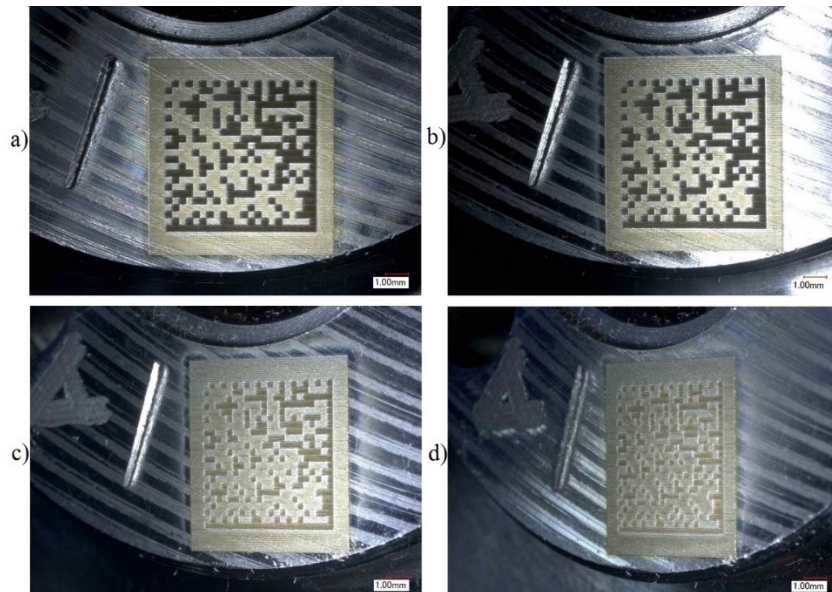
Rysunek 11. Ocena dokładności kodu przez kamerę HawkEye 1525HD, dla obrazu „a” z rysunku 10. Niebieską obwódką zaznaczono parametry kamery, natomiast żółtą – ocenę dokładności odczytu [19]



Rysunek 12. Ocena dokładności kodu przez kamerę HawkEye 1525HD, dla obrazu „b” z rysunku 10. Niebieską obwódką zaznaczono parametry kamery, natomiast żółtą – ocenę dokładności odczytu [19]

Ponieważ jako ocenę końcową kodu przyjmuje się najgorszą wartość ocenianego parametru, w obu przypadkach będzie to ocena B. W pierwszym przypadku obraz (rys. 10) jest ciemniejszy, jego kontrast jest w związku tym gorszy, natomiast jednolitość kolorytu kodu i tła jest większa. W drugim przypadku obraz (rys. 11)

wydaje się być bardziej wyraźny, natomiast ze względu na jego niewielkie „prześwietlenie”, przerost wydruku określający stopień wypełnienia ciemnych pól kodu w stosunku do jego tła został oceniony mniej korzystnie. Podczas znakowania obiekt nie poruszał się, w związku z tym nie występowało ryzyko nierównomierności osiowej kodu. Symbol był kompletny, bez uszkodzeń, dlatego nie było konieczności wykorzystania korekcji błędów.



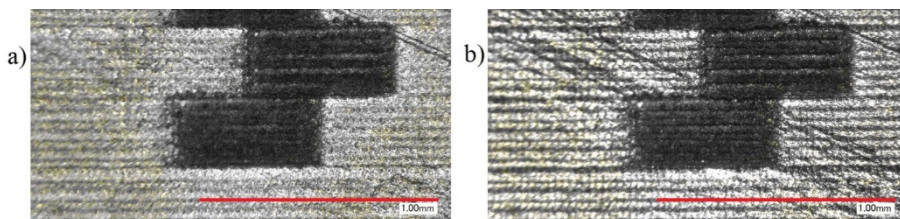
Rysunek 13. Wygląd kodu w zależności od kąta jego obserwacji: a) 90°; b) 75°; c) 60°; d) 45° [19]

Na rysunku 13 przedstawiono różnice w wyglądzie kodu, w zależności od kąta jego obserwacji. Obiektyw z oświetlaczem ustawiono prostopadle do powierzchni, znakowanego elementu, a następnie odchyłono go o 15, 30 i 45 stopni.

Odchylenie kąta w zakresie $\pm 15^\circ$ od pionu, nie miało zauważalnego wpływu na wygląd symbolu. Dla kąta 30° kontrast kodu był gorszy, natomiast był w dalszym ciągu czytelny. W przypadku odchylenia o 45° nastąpiło znaczące pogorszenie kontrastu oraz występowała nierównomierność osiowa. Zastosowanie specjalistycznej kamery, powinno jednak skutkować poprawnym odczytem kodu.

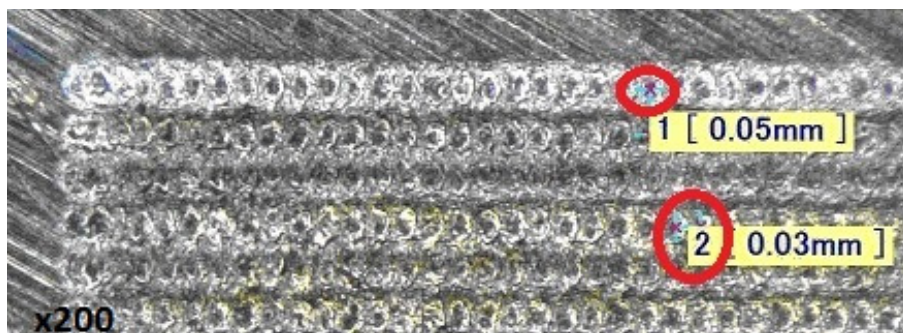
Tak więc, ocena jakości kodu zależy nie tylko od jego fizycznego wykonania, ale również od sposobu jego odczytu.

Na rysunku 14 przedstawiono wybrany fragment symbolu kodu DataMatrix. Dla porównania, wykonano fotografie podczas stosowania oświetlenia tradycyjnego i krawędziowego (dark-field).



Rysunek 14. Fragment kodu DataMatrix: a) z oświetleniem tradycyjnym; b) z oświetleniem krawędziowym [19]

Na rysunku 15 przedstawiono fragment symbolu wykonanego kodu. Można zobaczyć, jak różni się tło kodu, od powierzchni metalu. Wyraźnie widoczne są także miejsca, w których wyzwalana jest wiązka lasera. Nie jest to więc obróbka ciągła, ale odpowiednie zagęszczenie śladów oddziaływania lasera na powierzchnię części, co sprawia, że symbol wydaje się być naniesiony jednolicie. Podczas wykonywania kodu DataMatrix, wiązka lasera przemieszczała się poziomo, a następnie odsuwała o pewną odległość, przed wykonaniem kolejnej linii.



Rysunek 15. Fragment struktury kodu DataMatrix [19]

Odległość, pomiędzy widocznymi (rys. 15) sąsiednimi śladami oddziaływania lasera zależy od częstotliwości impulsów, oraz od prędkości ruchu zwierciadeł lasera. W omawianym przypadku, odległość ta wynosiła 0,03 mm. Odległość pomiędzy poszczególnymi liniami, zależy natomiast od ustawień kodu DataMatrix w projekcie znakownika i w tym przypadku, dla tła wynosiła ona 0,05 mm.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych stwierdzono, że zastosowanie opisanego stanowiska wyposażonego w system wizyjny, składającego się z kamery HawkEye 1525HD oraz stosownego oprogramowania umożliwia ocenę dokładności wykonywanego kodu DataMatrix. Zasadniczym celem badań było określenie jakości kodów DataMatrix wykonanych przy ściśle określonych parametrach znakowania laserowego, którego czas trwania dla analizowanego kodu wynosił 8,6s. Przeprowadzono po dwa odczyty kodu z następującymi parametrami: dla pierwszego przypadku ekspozycja wynosiła 3780 μ s, natomiast wzmocnienie 220.

W drugim przypadku, wykorzystano następujące parametry: ekspozycja 2577 μ s, wzmacnienie 302. Zgodnie ze skalą ocen ISO (International Organization for Standardization) określono dla analizowanych dwóch przypadków następujące parametry charakteryzujące wykonany kod DataMatrix: kontrast, przerost, nierównomierność osiową oraz niewykorzystaną korekcję błędów. Dla pierwszego przypadku otrzymano następujące wskaźniki: kontrast (Contrast) B(58), przerost wydruku (Growth) A, nierównomierność osiową (Axial NU) A, niewykorzystaną korekcję błędów (UEC) A. Dla drugiego przypadku otrzymano uzyskano: kontrast (Contrast) A (79), przerost wydruku (Growth) B, nierównomierność osiową (Axial NU) A, niewykorzystaną korekcję błędów (UEC) A. Na podstawie uzyskanych wskaźników określono, że zarówno dla pierwszego, jak i drugiego przypadku analizy z podanymi parametrami, ocena końcowa kodu DataMatrix odpowiada najgorszej wartości ocenianego parametru. W obu przypadkach ocena kodów odpowiada poziomowi B, czyli w położeniu tej oceny na skali literowej jakość wykonanego kodu zbliżona jest do najlepszej.

Do przeprowadzenia oceny dokładności naniesionych kodów posłużono się specjalistyczną kamerą, przeznaczoną do odczytu kodów wykonanych na błyszczących powierzchniach, w technologii DPM. Umożliwiło to wykonanie odczytu, nawet w przypadku symbolu niskiej klasy. Ustalając parametry znakowania, można zatem przyjąć pewien kompromis pomiędzy czasem czy kosztami znakowania, a jakością, o ile tylko czytelność kodu umożliwi jego wykorzystanie, zgodnie z przeznaczeniem. Warto jednak pamiętać, że im mniej nakładów ponosi się na wykonanie kodu, tym więcej trzeba ponieść na jego odczytanie.

LITERATURA

1. ANTOŃCZAK A. J.: Wybrane zagadnienia z laserowej modyfikacji materiałów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2014.
2. CHRYSSOLOURIS G.: Laser Machining - Theory and Practice, Springer, Nowy Jork, 1991.
3. JÓŻWICKI R.: Optyka laserów, WNT, Warszawa, 1981.
4. KACZMAREK F.: Podstawy działania laserów, WNT, Warszawa, 1983.
5. RUSZAJ A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi, IOS, Kraków, 1999.
6. CHU H., CHANG C., LEE R., MITRA N.: Halftone QR Codes, ACM Transactions on Graphics, Vol. 32, No. 6, Article 217 (2013)11, 217:2-217:8.
7. DESMEULES J. F., CÔTÉ B., DUFOUR J. D.: Semi Finished Products Traceability Improvement with Laser Marking, Springer, Minerals, Materials Society, (2017), 1069-1079.
8. JANGSOMBATSIRI W., PORTER J. D.: Artificial Neural Network Approach to Data Matrix Laser Direct Part Marking, Journal of Intelligent Manufacturing, **17**(2006), 133–147.
9. LENK A., WITKE T.: Decoration of Glass by Surface and Sub-surface Laser Engraving, Springer, Berlin, 2000.
10. MIKHEEV G. M.: Polarization-induced curvature of a laser damage channel, Technical Physics Letters **23**(1997)5, 90-94

11. PIVARČIOVÁ E., KARRACH L., TUČKOVÁ Z.: Optimization of manipulation logistics using Data Matrix codes, *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, **12**(2018)3, 173–180.
12. READY J.: Lasers-Their Unusual Properties and Their Influence on Applications, *Lasers in Modern Industry*, Society of Manufacturing Engineers Marketing Services Dept., Dearborn, MI, (1979), 17-38.
13. WEEDON, T. M.: Application of Solid State Lasers in Manufacturing Industry, *Proceedings of the First International Conference on Lasers in Manufacturing*, , **11**(1983), 1-12.
14. ISO/IEC 15415. Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Bar code symbol print quality test specification — Two-dimensional symbols.
15. ISO/IEC 16022. Information technology – Automatic Identification and data capture techniques – Data Matrix barcode symbology specification.
16. Instrukcja użytkowania lasera znakującego Trumpf VectorMark Compact VMC3 autorstwa HAAS-LASER GmbH, dokument nr HK-02-12-00 07/2000.
17. Omówienie i wprowadzenie techniczne do wykorzystywania kodu DataMatrix, zgodnego z systemem GS1, tłumaczenie własne, wydanie 2.5.1,
18. https://www.gs1.org/docs/barcodes/GS1_DataMatrix_Guideline.pdf, 01.08.2019.
19. Podstawowe informacje oraz typy kodów 2D, wg. firmy Keyence, nr dokumentu AS_104546, sygnatura 611K39,
20. http://www.keyence.com/download/download/confirmation/?dlAssetId=AS_104546, 05.08.2019 r.
21. SZCZYGIEŁ P.: Problematyka znakowania laserowego kodów na elementach części maszyn. Praca dyplomowa magisterska. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2020.