

Justyna MOLENDĄ, Adam CHARCHALIS
 Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

THE USE OF THERMOGRAPHY IN PRELIMINARY RESEARCH ON TEMPERATURE OF BURNISHING

Wykorzystanie termografii do monitorowania temperatury procesu nagniatania

Abstract: *The paper presents the methodology and results of experimental works concerning temperature of burnishing process. The research was carried out during disk burnishing of external cylindrical surfaces on a universal lathe CDS 6250 BX-1000 with severe parameters. As workpiece material steel S235JR has been selected. For temperature measurements infrared thermography method was chosen. This technique has a lot of advantages, the main is that it is non-contact technique and therefore there is no disturbance of the temperature field. In presented research infrared camera E95 produced by FLIR® Systems Inc. was used. Test results indicates the slight influence of process parameters on burnishing temperature.*

Keywords: burnishing process, IR thermography, plastic working, shaft working, finishing working

Streszczenie: *W pracy przedstawiono metodykę i wyniki prac eksperymentalnych związanych z wyznaczeniem temperatury nagniatania. Badania prowadzono w trakcie nagniatania krążkowego zewnętrznych powierzchni walcowych na tokarce uniwersalnej CDS 6250 BX-1000 przy różnych parametrach obróbki. Jako materiał obrabiany przyjęto stal S235JR. Do pomiarów temperatury wybrano metodę termograficzną, ze względu na szereg jej zalet na tle innych metod. Główną zaletą jest możliwość zdalnego, bezkontaktowego pomiaru, dzięki czemu rozkład temperatury na powierzchni jest niezakłócony. W przedstawionych badaniach do pomiaru temperatury stosowano kamerę E95 firmy FLIR® Systems, Inc. Wyniki badań wskazują, że wpływ parametrów nagniatania na temperaturę w strefie obróbki jest niewielki.*

Słowa kluczowe: nagniatanie, termografia, obróbka plastyczna, obróbka wałów, obróbka wykończeniowa

1. Introduction

Nowadays, the quality of surface finish is a significant requirement for many workpieces including the most common cylindrical surfaces which are widely used in machine construction in many different industries. Among other manufacturing methods burnishing is that allows to improve the components quality (i.e. surface hardness, fatigue strength and/or wear resistance) by reducing the roughness of machined parts. This process is a method of mechanical surface treatment which is carried out quickly and practically with the help of an apparatus which is easy to manufacture and low cost. The principle of the burnishing process is based on an indenting tool (ball or roller) rolling against the workpiece's surface [1, 3, 7].

Burnishing is generally considered as a cold working process. However, there can be observed minimal temperature rise, caused by contact of the tool and the workpiece. The understanding of heat build-up and heat distribution in working area, on the finishing stages of part's treatment is always important, not only for cognitive reasons, but also for minimization of possible effect of the heat peaks onto the development of performance properties of treated parts and conditions of tool work. It is particularly important in the aspect of avoiding or minimizing the use of cutting fluids in machining operations for ecological, human health problems caused by the cutting fluid and of course financial reasons [2, 11, 12].

In machining the major amount of plastic energy, used for deforming the specimen, gets converted into heat. Since first works concerning temperature measuring during machining, scientist and researchers have been developing various methods and techniques to estimate the temperature variations at various points of tool, chip and workpiece. These methods can be categorized in three broad categories, namely experimental, analytical and finite element analysis – based methods. The experimental techniques for the measurement of temperature during machining include thermocoupling with an embedded tool-chip pair, measurement of infrared radiation (pyrometers, infrared photography, etc.) and the use of thermos sensitive paint (TSP). Each technique has its own advantages and limitations depending on the physical measurement [6, 8].

Thermocouples are one of the most widely used experimental methods for measuring the temperature in machining. Thermocouples are uncomplicated, inexpensive, can be operated over a wide temperature range and can be easily applied; however, they only measures the mean temperature over the entire contact area of the tool and the workpiece. In order to estimate temperature distribution, there is a need to use many indicators of this type [6, 9].

In addition to thermocouples, IR techniques are probably the second most common method for measuring temperatures in machining. In the IR technique, the surface temperature of the body is measured based on its emitted thermal energy. Infrared measurements require a precise determination of the emissivity. An inaccurate emissivity value lead to a large temperature error. Can be used for every surface and material [5, 6, 8, 9, 13].

Thermo sensitive paint technique is simple and economical. TSP paint after blue light excitation emits red light with intensity dependent on its temperature. TSP technique accuracy can be increased by precisely prepared measurements (paint calibration) and proper data post-processing (special computational procedure). This technique has little use in machining processes [6, 8].

In the literature, there aren't many studies on the determination of temperature in the burnishing process, probably due to the fact that it is considered as a low-temperature process, hence any research leading to a better understanding of this issue is reasonable. For example, in [2] researchers develop a model of heat generation and distribution in the wide burnishing process, which allows to determine the temperature in the tool-workpiece contact. This model has not been experimentally verified and applies only to wide burnishing. The results of measuring the tool temperature during burnishing by using a diamond tip are presented in [12]. The researchers used a pyrometer to measure the temperature. In this work, the infrared measurement technique, thermovision camera, was proposed for measuring temperature. It allows not only remote temperature measurement during normal operation of machines and devices, but also for determining and visualizing its distribution in a given area [4, 11, 12].

2. The research methodology

The goal of the research was to check the influence of process parameters on burnishing temperature generated in tool-workpiece contact. As burnishing is finishing processing, surface roughness before and after processing was measured additionally. Experiments were carried out during static thrust rolling burnishing of outer surfaces of steel S235JR. It is a popular general construction and machine steel, actively used to implement civil engineering solutions. It has good plasticity, toughness and weldability and good properties for cold plastic processing. Steel structures made from S235JR steel for the construction of industrial and residential facilities, parts of power transmission towers, elements of equipment, offshore structures, oil and gas platforms, automobile bridges and other structures.

Before burnishing, shaft was pre-machined to diameter $d = 43$ mm by turning and prepared as is presented in fig. 1. The length of the element was divided to short sections, each for different burnishing parameters. Turning was performed with parameters as follows: feed $f = 0,15$ mm/rev, machining speed $vc = 112$ m/min and depth of cut $ap = 0.5$ mm. The tool was ISO 2R 2525 K10. Surface roughness obtained after turning was $Ra = 2,63$ μm .

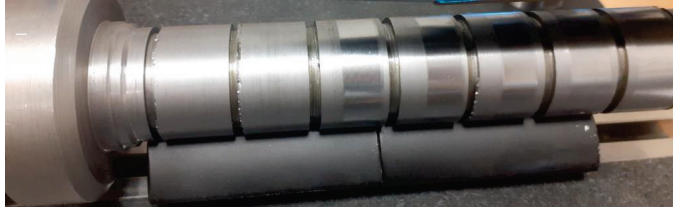


Fig. 1. View of steel S235JR shaft used in research

Burnishing was executed with use of NK-01 burnisher disc with hardness of 870 HV (fig. 2), made in Department of Marine Maintenance of Gdynia Maritime University. Both, turning and burnishing was performed on conventional turning machine CDS 6250 BX-1000.

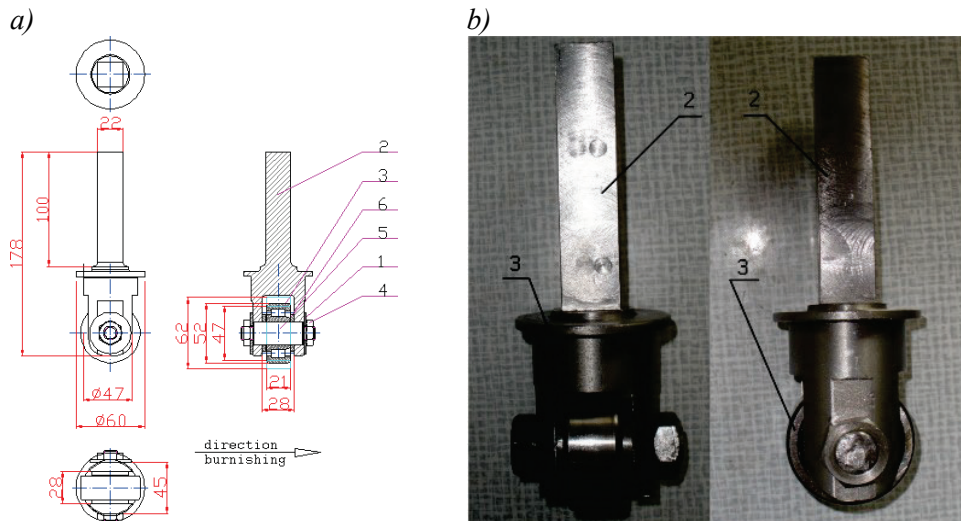


Fig. 2. Burnisher NK-01, a) schematic diagram, b) view of burnishing tool: 1 – washer; 2 – grip; 3 – burnishing element with a diameter of Ø52 mm; 4 – M12 nut; 5 – fitted pin with a diameter of Ø20 mm; 6 – spacers [4]

Experiments were conducted with different values of burnishing parameters: feed rate (f), depth of burnishing (a_n) and burnishing speed (v_n) differentiated according to three-level Hartley's plan. Parameters values were taken according to standard developed for used burnisher. All used values are collected in tab. 1.

Burnishing process was realized without cooling as temperature of tool-workpiece contact was measured. Temperature was measured by infrared camera E95 produced by FLIR® Systems, Inc. The camera serves for contact-less, remote temperature measurement and visualization of its distribution. Obtained thermogram consists of 161 472 measuring

points (464 points in 348 lines). The camera views and measures highest temperatures from -20 to +1800°C with thermal sensitivity $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$. The image capture support functions of a 5-megapixel digital camera [5].

Table 1

Values of burnishing parameters used during tests

Test no.	Burnishing parameters			
	Feed rate f [mm/rev]	Depth of burnishing a_n [mm]	Rotational speed n [rpm]	Burnishing speed v_n [m/min]
1	0.8	0.12	355	48
2	0.8	0.04	112	15
3	0.2	0.12	112	15
4	0.2	0.04	355	48
5	0.8	0.08	224	30
6	0.2	0.08	224	30
7	0.5	0.12	224	30
8	0.5	0.04	224	30
9	0.5	0.08	355	48
10	0.5	0.08	112	15
11	0.5	0.08	224	30

All methods of non-contact temperature measurement employed by the radiation thermometers are indirect methods. Output temperature is determined on the basis of the power of thermal radiation emitted by the tested object and measured in one or more spectral bands using different mathematical models. Parameters of the model are: emissivity of tested object, atmospheric temperature, relative humidity, object distance, reflected temperature compensation (RTC). All those parameters values can be changed by the operator in time of testing or after during analyzing the results. They should be estimated properly. Incorrect values will cause measurement error. The most influencing parameters are emissivity and reflected temperature compensation [5, 13]. Those two were obtained at the very beginning.

RTC which is the result of reflected radiation from the surroundings was analyzed first. In fig. 3 can be seen a special mirror. It was prepared with use of food grade aluminum foil with aim to gather reflections from many different angles. Average temperature from area Bx1, for emissivity $\varepsilon = 1$, is 21.9°C and this value was used as RTC in further measurements.

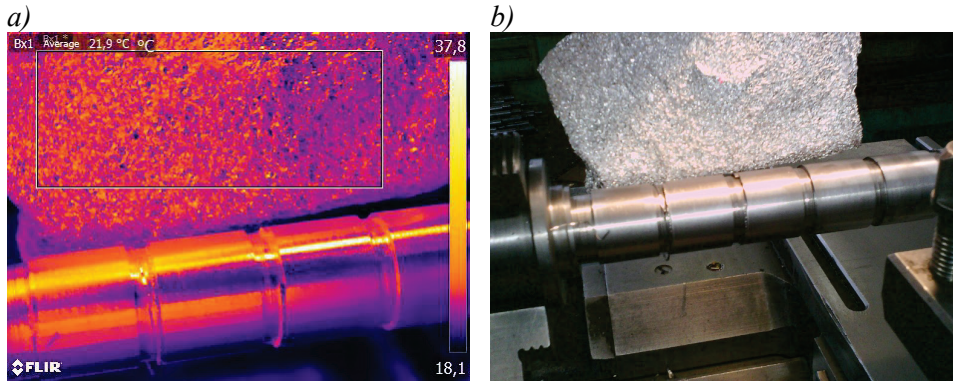


Fig. 3. Determining the value of reflected temperature compensation: a) thermal image, b) visible image

Emissivity was then obtained by method of applying reference emissivity. Black insulating tape was applied to the shaft as is shown in fig. 4. Its emissivity was known and equal 0.96. In the next step temperature of band (rectangular area Bx1) was measured (fig. 4). Subsequently, the temperature next to the band was measured (rectangular area Bx2), whereby the emissivity must simultaneously be adjusted until the same temperature measurement of the band is displayed.

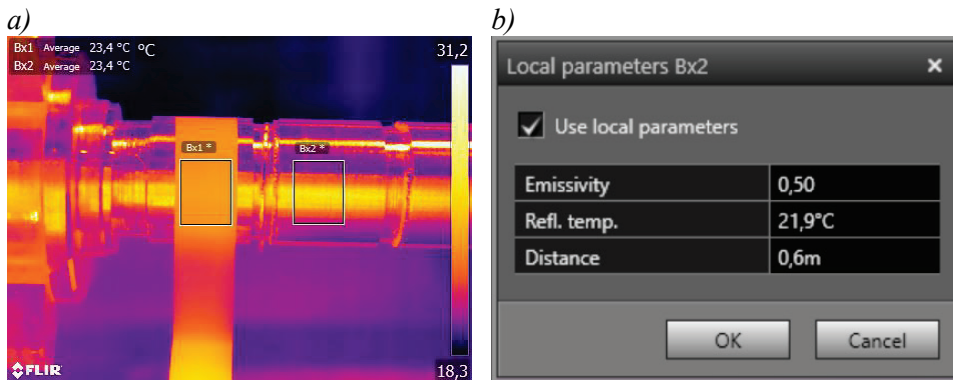


Fig. 4. Determining the value of shaft emissivity: a) thermal image, b) model parameters

Determined emissivity of the shaft was 0.50 which is consistent with emissivity tables (for steel $\epsilon = 0.56$).

Burnishing is finishing method and important factor connected with it is surface finish. As part of presented research the surface roughness was also measured. Hommel-Etamic W20 surface tester was utilized. After measurements of the arithmetical mean deviation of the roughness profile before (R_a) and after ($R'a$) burnishing were performed, surface roughness reduction ratio ($KRa = R_a/R'a$) was finally determined.

3. The research results

The results of the tool-workpiece contact temperature were obtained in described conditions and model parameters, i.e. emissivity, reflected temperature. For further analysis, average temperature in area shown in fig. 5 was taken into consideration.



Fig. 5. Area of measuring the temperature of tool-workpiece contact

Exemplary thermograms for tests number 1 and 7 are shown in fig. 6 a) and b) respectively.

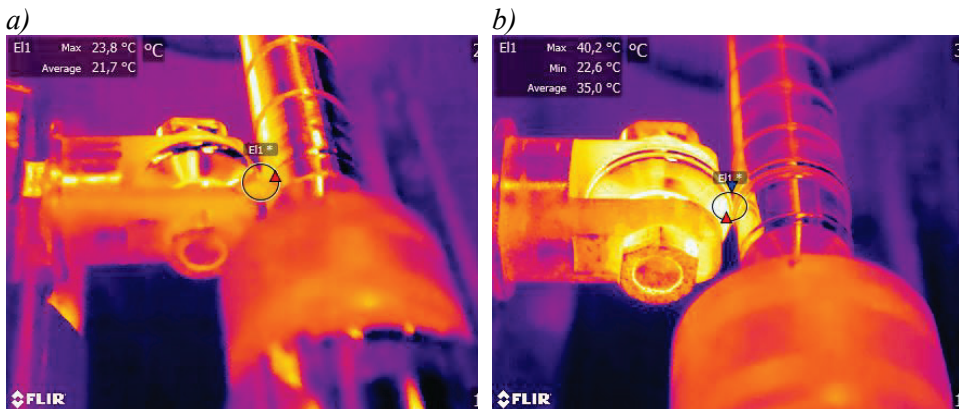


Fig. 6. Thermograms from tests: a) test no. 1, b) test no. 7

All values of maximum (T_{max}) and average (T_{ave}) temperature in presented area are collected in tab. 2.

Table 2

Results of experimental measurements of tool-workpiece contact

Test no.	Burnishing parameters			Temperature in tool-workpiece contact		Temperature of tool and workpiece	
	f [mm/rev]	a_n [mm]	v_n [m/min]	T_{max} [°C]	T_{ave} [°C]	T_{tool} [°C]	T_w [°C]
1	0.8	0.12	48	23.8	21.7	36.4	23.9
2	0.8	0.04	15	33.5	28.8	45.0	25.2
3	0.2	0.12	15	42.5	35.6	42.8	20.6
4	0.2	0.04	48	39.6	32.8	59.4	24.7
5	0.8	0.08	30	40.9	33.5	50.0	25.3
6	0.2	0.08	30	43.0	35.6	59.3	24.0
7	0.5	0.12	30	40.2	35.0	59.6	23.5
8	0.5	0.04	30	41.2	33.6	43.6	24.9
9	0.5	0.08	48	40.5	32.2	60.5	26.5
10	0.5	0.08	15	45.0	35.0	49.8	27.2
11	0.5	0.08	30	43.8	34.2	45.5	28.0

Presented temperature values indicates that amount of heat generated during that process is low compared to other machining processes, like turning or grinding. The highest obtained value in analyzed area is 45°C and is safe for tool and workpiece.

What was observed during all tests is that the most of heat generated during burnishing process is carried by the tool. Hence, maximum temperature of burnisher (T_{tool}) was observed. For further analysis, readings just after end of process were taken. For comparison, at the same time, temperature of workpiece surface (T_w) was also read as is depicted in fig. 7. Results for all tests are presented in tab. 2.



Fig. 7. Measurement of burnisher and workpiece temperature (test no. 1)

In order to confirm the effectiveness of the treatment and selected parameters, in the final stage of the research, arithmetic mean of roughness profile ordinates $R'a$ was measured and the surface roughness decrease index KRa was determined. The surface roughness before burnishing was $Ra = 2.63 \mu\text{m}$. All the results obtained are summarized in tab. 3. Presented values of $R'a$ and KRa confirm the improvement of the surface quality after treatment, and thus its effectiveness and correctness of used parameters.

Table 3

Results of measurements of surface roughness parameters

Test no.	Burnishing parameters			Surface roughness	
	Feed rate f [mm/rev]	Depth of burnishing a_n [mm]	Burnishing speed v_n [m/min]	$R'a$ [μm]	KRa [-]
1	0.8	0.12	48	1.03	2.55
2	0.8	0.04	15	0.32	8.22
3	0.2	0.12	15	0.43	6.12
4	0.2	0.04	48	0.40	6.58
5	0.8	0.08	30	0.38	6.92
6	0.2	0.08	30	1.14	2.31
7	0.5	0.12	30	0.65	4.05
8	0.5	0.04	30	0.37	7.11
9	0.5	0.08	48	0.36	7.31
10	0.5	0.08	15	0.34	7.74
11	0.5	0.08	30	0.24	10.96

4. Conclusions

After analyzing presented results, it seems that this influence of burnishing parameters on temperature exists, although it is small. However, some general trends can be observed. The average temperature in the tool-workpiece contact increases with the burnishing depth and decreases with the burnishing speed and feed. Research shows that most of the heat generated goes to the tool (T_{tool}). The shaft surface temperature (T_w) is approximately half the maximum tool temperature (28.0 and 60.5°C respectively). Both the temperature in the machining zone T_{ave} and T_{tool} change slightly (by about 10 and 20% respectively), regardless of the different parameter. The temperature values obtained are quite low, especially when compared with turning or grinding. The maximum tool temperature measured was 60.5°C. Within the scope of the tested parameters, the temperature in the machining zone varies in the range of 21.7÷35.6°C, while T_{tool} is 36.4÷60.5°C.

During experiments infrared thermography for measuring temperature was proposed. Due to its advantages, this technique works well in testing the burnishing process. Mainly due to the fact that it is non-contact and therefore there is no disturbance of the temperature field. However, it requires a well-prepared operator who avoids measurement errors and guarantees appropriate results. The use of an alternative method of temperature measurement, which is a thermocouple, is difficult in the case of moving parts and does not allow temperature measurement at the point of contact between the workpiece and the tool.

5. References

1. Al-Qawabeha U.F.: The Effect of Annealing Temperature and Roller Burnishing on the Microhardness and Surface Quality of AISI 3115 Alloy Steel. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2016, 13 (6).
2. Bobrovskij N.M, Melnikov P.A., Grigoriev S.N., Bobrovskij I.N.: Simulation of thermal fields using different types of wide burnishing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 91 012034, 2015.
3. Charchalis A., Dyl T., Rydz D., Stradomski G.: The effect of burnishing process on the change of the duplex cast steel surface properties. *Materials Engineering*, 2018, 6.
4. Dyl T.: Aspects of utilizing burnishing for reconditioning machine components. *Journal of KONBiN*, Vol. 50, Iss. 4, 2020, DOI 10.2478/jok-2020-0091.
5. www.flir.eu.
6. Goyal A., Dhiman S., Kumar S., Sharma R.: A study experimental temperature measuring techniques used in metal cutting. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2014, Vol. 2, No. 2.
7. Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z.: Analysis of surface geometry changes after hybrid milling and burnishing by ceramic ball. *Materials*, 2019, 12, 1179.
8. Jeziorek Ł., Widera P.: Temperature measurements using thermal sensitive paint. *Transactions of the Institute of Aviation*, 2018, 3 (252).
9. Kus A., Isik Y., Cakir M. C., Coskun S., Ozdemir K.: Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. *Sensors*, 2015, 15.
10. Molenda J., Charchalis A.: Preliminary research of possibility of using thermovision for diagnosis and predictive maintenance of marine engines. *Journal of KONBiN*, Vol. 49, Iss. 3, 2019, DOI 10.2478/jok-2019-0050.
11. Molenda J.: The experimental investigation of using thermography inspection for dry turning process diagnosis. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 2020, 15.
12. Okada M., Shinya M., Tanaka H., Asanawa N., Otsu A.: Measurement of tool temperature in burnishing using diamond tip. *Mechanical Engineering Journal*, 2016, Vol. 3, No. 2.
13. Principles of noncontact temperature measurement, Fluke Process Instrument.

WYKORZYSTANIE TERMOGRAFII DO MONITOROWANIA TEMPERATURY PROCESU NAGNIATANIA

1. Wprowadzenie

Wymagania stawiane częściom maszyn w kwestii jakości powierzchni i dokładności wymiarowo-kształtowej mają obecnie szczególne znaczenie. Dotyczy to również zewnętrznych powierzchni walcowych części, szeroko stosowanych w konstrukcji maszyn, w wielu gałęziach przemysłu. Oprócz innych metod obróbki, nagniatanie to ta, która oprócz zmniejszenia chropowatości obrabianych powierzchni, pozwala na poprawę ich jakości, np. w zakresie twardości powierzchni, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na zużycie. Jest to proces obróbki plastycznej, szybki i tani, wymagający jedynie prostego wyposażenia. Podstawą obróbki nagniataniem jest odkształcanie plastyczne na zimno warstwy wierzchniej przedmiotu wskutek docisku elementu nagniatającego, narzędzia (np. kulka, rolka), do powierzchni obrabianej [1, 3, 7].

Zasadniczo, nagniatanie uważane jest za proces niskotemperaturowy, chociaż można zauważyć niewielkie ilości ciepła wydzielane w kontakcie roboczym narzędzia i przedmiotu obrabianego. Zrozumienie procesu generowania ciepła i jego dystrybucji w strefie obróbki, w końcowych etapach obróbki części jest zawsze istotne, nie tylko ze względów poznawczych, ale również z uwagi na zminimalizowanie ewentualnego negatywnego wpływu chwilowych pików temperatury na przebieg procesu kształtowania właściwości użytkowych obrabianych elementów oraz pracę narzędzia. Szczególnie jest to ważne w aspekcie ograniczenia zużycia środków smarująco-chłodzących i zainteresowania obróbką „na sucho” ze względu na ochronę środowiska [2, 11, 12].

W obróbce materiałów, zasadnicza część energii plastycznej niezbędnej do formowania materiału zamieniana jest w głównej mierze w ciepło. Od czasu pierwszych prac na ten temat, badacze rozwinęli wiele metod wyznaczania temperatury narzędzia, wiórów i przedmiotu obrabianego. Metody te można podzielić na trzy grupy: eksperymentalne, analityczne i oparte na metodzie elementów skończonych. W badaniach eksperymentalnych do pomiaru temperatury w trakcie procesów obróbki wykorzystywano przede wszystkim technikę farby termoczułej, termopar czy detekcji promieniowania podczerwonego. Każda z tych metod ma swoje zalety i ograniczenia. Technika farby termoczułej jest prosta i tania. Farba tego typu, po uprzednim wzbudzeniu promieniowaniem o barwie niebieskiej, emituje promieniowanie o barwie czerwonej

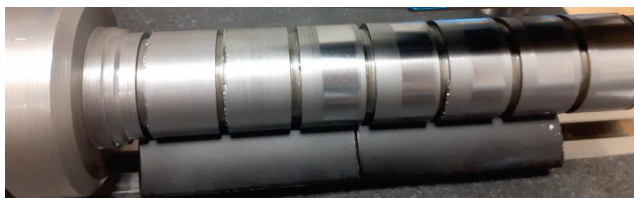
i intensywności zależnej od jej temperatury. Jej dokładność można zwiększyć poprzez właściwe przygotowanie do pomiarów (kalibracja farby) oraz staranną obróbkę pozyskanych danych (specjalna procedura obliczeniowa używana do przeliczenia zdjęcia na pole temperatury). Metoda ta w procesach obróbkowych znajduje niewielkie zastosowanie [6, 8]. Termopary natomiast znajdują szerokie zastosowanie w pomiarach temperatury w procesach obróbki materiałów. Są to proste, niedrogie czujniki, które mogą być stosowane do pomiaru szerokiego zakresu temperatur. Pomiar wymaga styku z badaną powierzchnią, a wyznaczona wartość jest temperaturą średnią w obszarze kontaktu. Wyznaczenie rozkładu temperatury wymaga zastosowania wielu czujników tego typu [6, 9]. Oprócz termopar, pomiary w podczerwieni są drugą najczęściej stosowaną techniką pomiarów temperatury w procesach obróbki. Metoda ta pozwala na wyznaczenie temperatury na powierzchni badanego ciała na podstawie promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez to ciało. Wymaga dokładnego wyznaczenia warunków pomiarów, w tym emisyjności, co ma duży wpływ na błąd pomiarów. Może być wykorzystywana do pomiaru temperatury różnych materiałów [5, 6, 8, 9, 13].

W literaturze przedmiotu niewiele jest prac dotyczących wyznaczenia temperatury w procesie nagniatania, prawdopodobnie ze względu na to, że jest on uważany za proces niskotemperaturowy, stąd wszystkie badania prowadzące do lepszego rozpoznania tego zagadnienia są uzasadnione. W pracy [2] na przykład, badacze rozwijają model generowania i dystrybucji ciepła w procesie nagniatania naporowego, który pozwala na wyznaczenie temperatury w kontakcie narzędzie – przedmiot obrabiany. Model ten nie został zweryfikowany doświadczalnie i dotyczy jedynie nagniatania naporowego. Wyniki badania temperatury nagniataka diamentowego przedstawiono w pracy [12]. Do pomiaru temperatury badacze zastosowali pirometr. W niniejszej pracy, do pomiaru temperatury zaproponowano technikę pomiarów w podczerwieni, która pozwala nie tylko na zdalny pomiar temperatury w trakcie normalnej pracy maszyn i urządzeń, ale również na wyznaczenie i zobrazowanie jej rozkładu w zadanym obszarze [4, 11, 12].

2. Metodyka badań

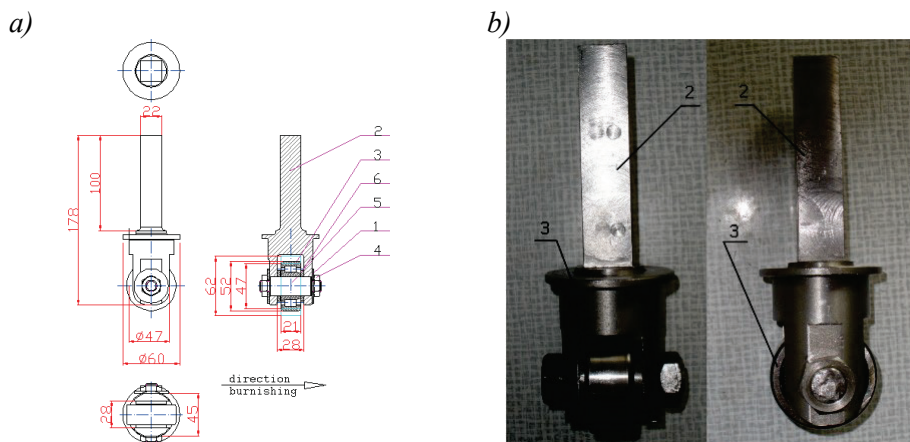
Celem badań było dokładniejsze określenie zależności pomiędzy parametrami procesu nagniatania a temperaturą powstającą w kontakcie narzędzie–przedmiot. Ponieważ nagniatanie jest obróbką wykończeniową, dodatkowo zmierzono chropowatość powierzchni przed obróbką i po niej. Eksperymenty przeprowadzono podczas nagniatania statycznego walcowych powierzchni zewnętrznych ze stali S235JR. Jest to popularna stal ogólnobudowlana i maszynowa, często wykorzystywana w rozwiązaniach inżynierskich. Charakteryzuje się dobrą plastycznością, wytrzymałością i spawalnością oraz dobrymi właściwościami do obróbki plastycznej na zimno. Konstrukcje ze stali S235JR stosuje się do budowy obiektów przemysłowych i mieszkalnych, części wież energetycznych, elementów wyposażenia, konstrukcji offshore, platform naftowych i gazowych, mostów samochodowych i innych konstrukcji.

Przed nagniataniem wał został wstępnie obrobiony do średnicy $d = 43$ mm przez toczenie i przygotowany jak na rys. 1. Długość elementu została podzielona na krótkie odcinki, każdy dla innych parametrów nagniatania. Toczenie wykonano przy parametrach: posuw $f = 0,15$ mm/obr, prędkość skrawania $v_c = 112$ m/min i głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm. Narzędziem był nóż tokarski ISO 2R 2525 K10. Chropowatość powierzchni uzyskana po toczeniu wyniosła $R_a = 2,63$ μm .



Rys. 1. Przedmiot obrabiany

Do nagniatania wykorzystano nagniatak NK-01 o twardości części roboczej 870 HV (rys. 2), wykonany w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Toczenie i nagniatanie wykonano na konwencjonalnej tokarce CDS 6250 BX-1000.



Rys. 2. Nagniatak NK-01: a) schemat, b) zdjęcie: 1 – podkładka; 2 – uchwyt; 3 – element nagniatający o średnicy $\varnothing 52$ mm; 4 – nakrętka M12; 5 – sworzeń pasowany o średnicy $\varnothing 20$ mm; 6 – podkładki dystansowe [4]

Badania przeprowadzono, różnicując wartości parametrów nagniatania: posuw (f), wcisk (a_n) i prędkość nagniatania (v_n), według trzystopniowego planu Hartleya. Wartości parametrów obróbki zostały dobrane zgodnie z normatywami opracowanymi dla zastosowanego nagniataka. Wszystkie wartości parametrów nagniatania zebrano w tab. 1.

Tabela 1

Plan badań dla procesu nagniatania

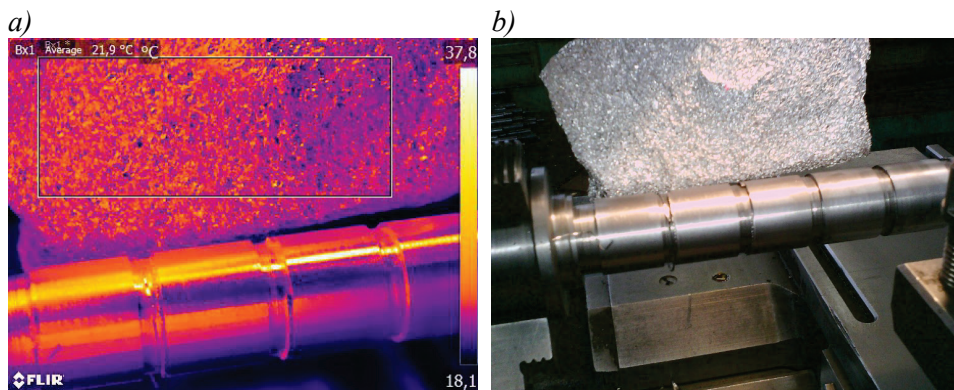
Nr	Parametry nagniatania			
	Posuw f [mm/rev]	Wcisk a_n [mm]	Prędkość obrotowa n [obr/min]	Prędkość nagniatania v_n [m/min]
1	0,8	0,12	355	48
2	0,8	0,40	112	15
3	0,2	0,12	112	15
4	0,2	0,04	355	48
5	0,8	0,08	224	30
6	0,2	0,08	224	30
7	0,5	0,12	224	30
8	0,5	0,04	224	30
9	0,5	0,08	355	48
10	0,5	0,08	112	15
11	0,5	0,08	224	30

Ze względu na cel badań – pomiar temperatury na styku narzędzia z przedmiotem obrabianym, proces nagniatania realizowano bez chłodzenia. Temperaturę mierzono kamerą termowizyjną E95 wyprodukowaną przez FLIR® Systems, Inc. Kamera służy do bezdotykowego, zdalnego pomiaru temperatury i wizualizacji jej rozkładu. Otrzymany termogram składa się z 161 472 punktów pomiarowych (464 punkty w 348 wierszach). Kamera wyświetla i mierzy temperatury w zakresie od -20 do +1800°C z czułością termiczną $\pm 0,03^\circ\text{C}$. Dodatkowo wyposażona jest w 5-megapikselowy aparat cyfrowy [5].

Wszystkie metody bezdotykowego pomiaru temperatury wykorzystujące promieniowanie są metodami pośrednimi. Temperaturę wyznacza się na podstawie mocy promieniowania cieplnego emitowanego przez badany obiekt, w jednym lub kilku pasmach widmowych, za pomocą różnych modeli matematycznych. Parametrami modelu są: emisyjność badanego obiektu, temperatura atmosfery, wilgotność względna, odległość obiektu, temperatura promieniowania odbitego (RTC – *reflected temperature compensation*). Wartości tych parametrów mogą być zmieniane przez operatora w czasie pomiarów lub w trakcie analizy wyników. Powinny one być odpowiednio oszacowane, gdyż nieprawidłowe wartości spowodują błąd pomiaru. Najistotniejszymi parametrami są w tym względzie emisyjność i temperatura promieniowania odbitego [5, 13]. Zostały one wyznaczone przed rozpoczęciem badań zasadniczych.

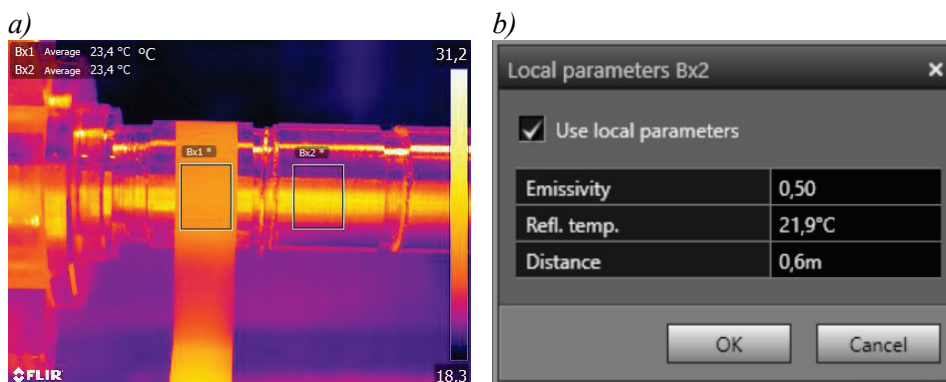
W pierwszej kolejności wyznaczono „temperaturę odbitą”, która wynika z promieniowania emitowanego przez źródła z otoczenia. Na rys. 3 przedstawiono specjalny odbłyśnik, w postaci folii aluminiowej, pogniecionej w celu zebrania

promieniowania z różnych kątów. Średnia temperatura z obszaru Bx1, przy emisyjności $\epsilon = 1$, wyniosła $21,9^{\circ}\text{C}$ i tę wartość wykorzystano jako RTC w dalszych pomiarach.



Rys. 3. Wyznaczanie wartości temperatury promieniowania odbitego: a) obraz termalny, b) obraz widzialny

Emisyjność została wyznaczona metodą zastosowania emisyjności referencyjnej. Na wał nałożono czarną taśmę izolacyjną, jak pokazano na rys. 4. Jej emisyjność była znana i wynosiła 0,96. W kolejnym kroku zmierzono temperaturę taśmy (obszar Bx1). Następnie, zmierzono temperaturę obok opaski (obszar Bx2) i tak regulowano emisyjność w tym obszarze, aż wartości temperatury w obu obszarach miały tę samą wartość.



Rys. 4. Wyznaczenie emisyjności materiału obrabianego: a) obraz termalny, b) parametry pomiarów

Wyznaczona w ten sposób emisyjność wału wynosiła 0,50, co jest zgodne z tabelami emisyjności (dla stali $\epsilon = 0,56$).

Nagniatanie jest metodą obróbki wykończeniowej, dlatego ważnym czynnikiem z nim związanym jest jakość powierzchni. W ramach prezentowanych badań dokonano również

pomiaru chropowatości powierzchni. Pomiary wykonano, wykorzystując profilometr Hommel-Etamic W20. Po wykonaniu pomiarów średniej arytmetycznej odchyłki profilu chropowatości przed (Ra) i po ($R'a$) nagniataniu, wyznaczono współczynnik redukcji chropowatości powierzchni ($KRa = Ra/R'a$).

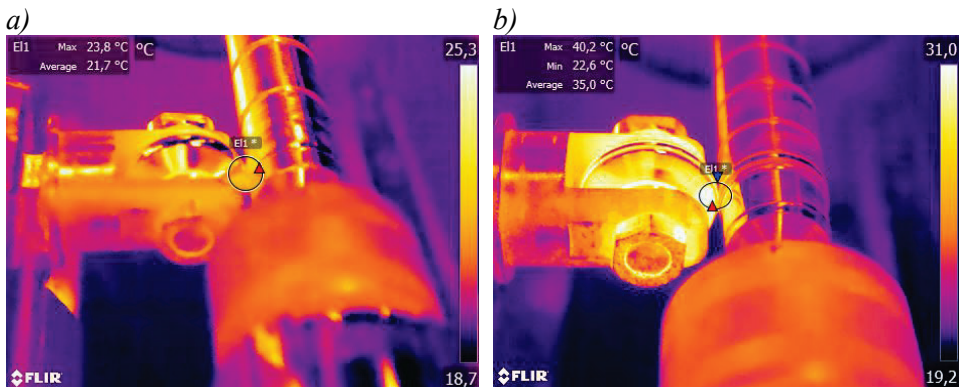
3. Wyniki badań

Wyniki pomiaru temperatury na styku narzędzie–przedmiot obrabiany uzyskano w opisanych warunkach i parametrach modelu, tj. emisyjności, RTC. Do dalszej analizy przyjęto średnią temperaturę w ograniczonym obszarze, pokazanym na rys. 5.



Rys. 5. Powierzchnia pomiarowa temperatury na styku narzędzie–przedmiot

Przykładowe termogramy uzyskane w trakcie prób o numerach 1 i 7 przedstawiono na rysunku 6 a) i b) odpowiednio.



Rys. 6. Termogramy z prób: a) numer 1, b) numer 7

Wartości temperatury maksymalnej (T_{\max}) i średnie ($T_{\text{śr}}$) we wskazanym obszarze dla wszystkich prób zebrano w tab. 2.

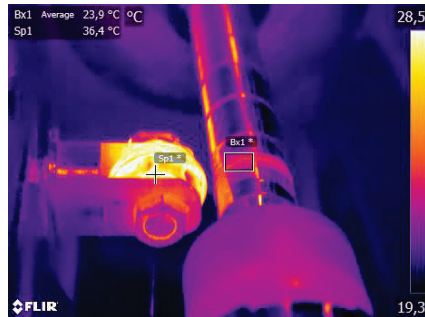
Tabela 2

Wyniki pomiarów temperatury na styku narzędzie–przedmiot obrabiany

Nr	Parametry nagniatania			Temperatura na styku narzędzie–przedmiot obrabiany		Temperatura nagniatąka i przedmiotu obrabianego	
	f [mm/rev]	a_n [mm]	v_n [m/min]	T_{\max} [°C]	T_{ave} [°C]	T_{tool} [°C]	T_w [°C]
1	0,8	0,12	48	23,8	21,7	36,4	23,9
2	0,8	0,04	15	33,5	28,8	45,0	25,2
3	0,2	0,12	15	42,5	35,6	42,8	20,6
4	0,2	0,04	48	39,6	32,8	59,4	24,7
5	0,8	0,08	30	40,9	33,5	50,0	25,3
6	0,2	0,08	30	43,0	35,6	59,3	24,0
7	0,5	0,12	30	40,2	35,0	59,6	23,5
8	0,5	0,04	30	41,2	33,6	43,6	24,9
9	0,5	0,08	48	40,5	32,2	60,5	26,5
10	0,5	0,08	15	45,0	35,0	49,8	27,2
11	0,5	0,08	30	43,8	34,2	45,5	28,0

Przedstawione wartości wskazują, że ilość ciepła wytworzona podczas nagniatania jest niewielka w porównaniu do innych rodzajów obróbki, takich jak toczenie czy szlifowanie. Najwyższa uzyskana wartość w analizowanym obszarze wynosi 45°C i jest bezpieczna dla narzędzia i przedmiotu obrabianego.

We wszystkich testach zaobserwowano, że większość ciepła wytworzonego podczas procesu nagniatania jest przenoszona przez narzędzie. W związku z tym przeanalizowano również maksymalną temperaturę nagniatąka (T_{tool}) zmierzoną tuż po zakończeniu obróbki. Dla porównania, w tym samym czasie wyznaczono również temperaturę na powierzchni przedmiotu obrabianego (T_w), jak przedstawiono na rys. 7. Wyniki dla wszystkich prób zebrano w tab. 2.



Rys. 7. Pomiar temperatury nagniatka i przedmiotu obrabianego w próbie nr 1

Dla potwierdzenia skuteczności przeprowadzonej obróbki oraz dobranych parametrów, w końcowym etapie badań zmierzono chropowatość powierzchni, opisaną parametrem R_a oraz wyznaczono wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni KRa . Chropowatość powierzchni przed nagniataniem wynosiła $R_a = 2,63 \mu\text{m}$. Wszystkie otrzymane wyniki zebrano w tabeli 3. Przedstawione wartości $R'a$ oraz KRa potwierdzają poprawę jakości powierzchni po obróbce, a tym samym jej skuteczność i poprawność zastosowanych parametrów.

Tabela 3

Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni dla wszystkich prób

Nr	Parametry nagniatania			Chropowatość powierzchni	
	Posuw f [mm/rev]	Wcisk a_n [mm]	Prędkość nagniatania v_n [m/min]	$R'a$ [μm]	KRa [-]
1	0,8	0,12	48	1,03	2,55
2	0,8	0,04	15	0,32	8,22
3	0,2	0,12	15	0,43	6,12
4	0,2	0,04	48	0,40	6,58
5	0,8	0,08	30	0,38	6,92
6	0,2	0,08	30	1,14	2,31
7	0,5	0,12	30	0,65	4,05
8	0,5	0,04	30	0,37	7,11
9	0,5	0,08	48	0,36	7,31
10	0,5	0,08	15	0,34	7,74
11	0,5	0,08	30	0,24	10,96

4. Wnioski

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie wpływu parametrów nagniatania na temperaturę w strefie obróbki. Po analizie przedstawionych wyników wydaje się, że wpływ ten istnieje, choć jest niewielki i w zasadzie podobny dla wszystkich parametrów. Można jednak zaobserwować pewne ogólne trendy. Średnia temperatura w kontakcie narzędzie–przedmiot rośnie wraz z głębokością nagniatania i maleje wraz z prędkością nagniatania i posuwem. Badania wskazują, że większość wytworzonego ciepła trafia do narzędzia (T_{tool}). To najbardziej nagrzewający się element. Temperatura na powierzchni wału (T_w) wynosi ok. połowy maksymalnej temperatury narzędzia (28,0°C i 60,5°C odpowiednio). W przypadku T_{tool} jakkolwiek zależność widać tylko w stosunku do wcisku, temperatura rośnie proporcjonalnie do niego. Zarówno temperatura w strefie obróbki T_{ave} jak i temperatura narzędzia T_{tool} zmieniają się w niewielkim zakresie (o ok. 10 i 20% odpowiednio) niezależnie od różnicowanego parametru. Uzyskane wartości temperatur są dość niskie, zwłaszcza w porównaniu z toczeniem lub szlifowaniem. Maksymalna zmierzona temperatura narzędzia wynosiła 60,5°C. W zakresie badanych parametrów temperatura w strefie obróbki zmienia się w zakresie 21,7÷35,6 °C, natomiast temperatura narzędzia 36,4÷60,5 °C.

Podczas eksperymentów do pomiaru temperatury zaproponowano termografię w podczerwieni. Technika ta, ze względu na swoje zalety, dobrze sprawdza się w badaniach procesu nagniatania. Głównie ze względu na to, że jest bezkontaktowa, a zatem nie ma zakłóceń pola temperatury. Wymaga jednak dobrze przygotowanego operatora, który unika błędów pomiarowych i gwarantuje odpowiednie wyniki. Zastosowanie alternatywnej metody pomiaru temperatury, jaką jest termoelement, jest utrudnione w przypadku elementów ruchomych i nie umożliwia pomiaru temperatury w miejscu styku przedmiotu obrabianego z narzędziem.

5. Literatura

1. Al-Qawabeha U.F.: The Effect of Annealing Temperature and Roller Burnishing on the Microhardness and Surface Quality of AISI 3115 Alloy Steel. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2016, 13 (6).
2. Bobrovskij N.M, Melnikov P.A., Grigoriev S.N., Bobrovskij I.N.: Simulation of thermal fields using different types of wide burnishing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 91 012034, 2015.
3. Charchalis A., Dyl T., Rydz D., Stradomski G.: The effect of burnishing process on the change of the duplex cast steel surface properties. *Materials Engineering*, 2018, 6 (226).
4. Dyl T.: Aspects of utilizing burnishing for reconditioning machine components. *Journal of KONBiN*, Vol. 50, Iss. 4, 2020, DOI 10.2478/jok-2020-0091.

5. www.flir.eu.
6. Goyal A., Dhiman S., Kumar S., Sharma R.: A study experimental temperature measuring techniques used in metal cutting. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2014, Vol. 2, No. 2.
7. Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z.: Analysis of surface geometry changes after hybrid milling and burnishing by ceramic ball. *Materials*, 2019, 12, 1179.
8. Jeziorek Ł., Widera P.: Temperature measurements using thermal sensitive paint. *Transactions of the Institute of Aviation*, 2018, 3 (252).
9. Kus A., Isik Y., Cakir M. C., Coskun S., Ozdemir K.: Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. *Sensors*, 2015, 15.
10. Molenda J., Charchalis A.: Preliminary research of possibility of using thermovision for diagnosis and predictive maintenance of marine engines. *Journal of KONBiN*, Vol. 49, Iss. 3, 2019, DOI 10.2478/jok-2019-0050.
11. Molenda J.: The experimental investigation of using thermography inspection for dry turning process diagnosis. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 2020, 15.
12. Okada M., Shinya M., Tanaka H., Asanawa N., Otsu A.: Measurement of tool temperature in burnishing using diamond tip. *Mechanical Engineering Journal*, 2016, Vol. 3, No. 2.
13. Principles of noncontact temperature measurement, Fluke Process Instrument.