스마트폰 후면에 적용된 엔지니어링 기반 및 재료지각 기반 재료선택방법의 사례연구

최재호*

강릉원주대학교 공과대학 신소재금속공학과

A Case Study of Material Selection Method Based on Engineering and Material Perception Applied to the Smartphone Rear Panel

Jaeho Choi*

Department of Advanced Metal and Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University,
Gangneung 25457, Republic of Korea

Abstract: Smartphones were launched in the market as a product in the early 2000's. Today, less than 20 years later, the smartphone has become one of the most frequently used devices for human contact. The market is saturated, and competition between products has intensified, and it is not difficult to find products that are culled. To be selected by consumers, product differentiation must be outstanding, which is not easy when the basic technology is standardized. Currently, competition in the fields of cameras and displays is intensifying, but it is expected that advanced technology will become commonplace in the near future. There are several ways to increase the competitiveness and differentiation of a product, for example, by considering the technical aspects, or making the personality of the product unique. Consumers communicate with products through materials. The process and selection of materials suitable for the design requirements of a product is a very important component in competitive product manufacturing. The final material selection is performed by dividing the design requirements into function, constraints, personality, objectives, and supporting information aspects, and the selecting materials suitable for each stage. By capturing the overall concept as a function, the processes of selecting materials that meet the constraints, determining the type of material that matches the personality, and using the objectives to obtain the top-ranked materials, the final material suitable for all conditions can be selected by referring to supporting information from the top-ranked materials.

(Received August 23, 2021; Accepted October 18, 2021)

Keywords: design requirements, material perception, material selection, product personality, smartphone rear panel

1. 서 론

소비자는 제품을 선택하고, 생산자는 제품에 적합한 재료를 선택한다. 제품은 소비자에게 선택되어야 그 생명력이 살아난다. 일반적으로 소비자는 제품을 필요에 의해서 선택하지만, 요즘처럼 제품으로 포화된 세상에서는 필요해서가 아니라 좋아해서, 그냥 갖고 싶어서 제품을 선택하는

경우도 많다. 이런 경우, 다른 제품보다 탁월한 차별성이 있어야 선택을 받을 수 있다. 즉, 제품의 가치가 높아야 한다. 제품의 가치는 여러 방면으로 평가될 수 있는데, 성능이 우수하거나, 사용이 편리하거나, 미적으로 뛰어나거나, 개성이 독특하거나, 환경친화적인 면 등으로 평가될 수 있다 [1]. 제품의 가치가 높아질수록 생산자에게는 제품의 가격을 올릴 수 있는 여지가 생기며, 그에 따라 생산 경비 지출에서도 여유가 생긴다. 또한 제품가격 대비 가치도 유지 또는 향상되므로 소비자도 만족할 수 있다. 물론 생산 경비를 낮추고 제품가격을 낮추어 가격 대비 가치를 높이는 방법도 있으나, 제품의 가치를 높이는 방법이 제품의

- 최재호: 교수

*Corresponding Author: Jaeho Choi

[Tel: +82-33-640-2364, E-mail: cjh@gwnu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

경쟁력 차원에서는 더욱 효과적인 방법이 될 수 있다.

소비자는 재료를 통해서 제품과 교감하고 소통하며 제품을 경험한다. 재료는 기술적 기능과 제품의 개성을 부여한다 [1,2]. 따라서 제품에 적합한 재료의 선택은 혁신적인 제품디자인의 매우 중요한 요소이다. 제품디자이너는 재료 선택 과정에서 다섯 가지 측면, 즉 엔지니어링(Engineering), 사용(Use), 환경(Environment), 아름다움(Aesthetics), 개성(Personality) 측면 [3]과 여섯 가지 영역, 즉 감성적(Emotional), 연상적(Associative), 지각적(Perceptive), 감각적(Sensorial), 물리적(Physical), 사용적(Use) 면을 고려한다 [4]. 또한 재료의 경험적 특성을 중심으로 디자이너 측면과 소비자 측면의 차이를 고려한다 [5].

제품에 적합한 재료를 선택하는 과정을 구체적으로 살펴보면, Ashby의 엔지니어링 기반 재료선택 방법은 네 단계로 구성되는데, (1) 디자인 요구사항 서술 (Translate Design Requirements), (2) 제약조건을 사용한 선별 (Screen using Constraints), (3) 목표를 사용한 순위 매김 (Rank using Objectives), (4) 보조정보를 구함 (Seek Supporting Information)이다 [6,7]. 그리고 Choi는 소비자가 재료에 대해 느끼는 감정인 재료지각(Material Perception)을 이용하여 소비자가 요구하는 사항과 디자이너가 추구하는 사항 간의 경계 값의 계산을 통하여 소비자와 디자이너의 생각이 일치하는 정도를 구하였다 [8,9].

스마트폰은 1990년대에 처음 제작되었으며, 2007년에 현재의 형태와 비슷한 대중적인 제품이 되었다. 2021년, 현재 인간과의 접촉이 가장 많은 기기 중 하나가 되었다. 스마트폰은 주로 정보를 얻거나 다른 사람들과 연결을 하거나 은행업무와 쇼핑을 하거나 사진을 찍거나 녹음을 하거나 재미를 위해서 사용된다. 미래에는 연결망, 프로세서, 센서, 소프트웨어, 인공지능, 메모리, 배터리 등의 발달로 사무와 소비자의 사용영역에서 획기적인 성능향상이 이루어질 것이다. 스마트폰은 다양한 디자인 특징과 판매가격으로 시장에 출시되어 소비자의 선택을 기다리고 있다. 소비자가 스마트폰을 교체하는 이유로는, 단지 새 모델로 교체하고 싶은 사회경제적인 이유, 부주의하게 사용되어 손상되는 이유, 또는 소프트웨어 등의 기술적인 이유 등이 있다. 시장에서의 치열한 경쟁과 빨라지는 교체주기로 인하여 제품가치, 즉 경쟁력 있는 제품의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 스마트폰 후면 재료선택의 사례를 통하여 스마트폰 후면의 기능과 독특한 개성 향상의 디자인 요구사항에 적합한 재료를 선택하는 방법과 그에 따른 결과, 즉 선택된 재료에 대하여 알아본다.

Fig. 1. The strategy for materials selection [6-9]

2. 재료 선택방법

본 연구에서는 그림 1에서 보듯이, Ashby [6,7]의 엔지니어링 기반 재료선택방법과 Choi [8,9]의 재료지각과 제품개성 간의 확산경계 기반 재료선택방법을 혼합한 방법으로 재료선택을 한다. 재료선택은 대상이 되는 모든 재료에서 제품의 디자인 요구사항에 적합한 재료를 선택하는 과정이다. 차례대로 살펴보면 다음과 같다.

(1) 제품디자인에서 요구되는 사항들을 기능, 제약조건, 개성, 목표의 요소들로 디자인 요구사항을 서술하여 제품의 전반적인 윤곽을 잡는다.

(2) 제품이 반드시 가져야 하는 제약조건, 이를테면 재료의 강도 또는 열전도도가 어느 이상 되어야 한다는 등의 조건을 통하여 그 조건에 부합되지 않는 많은 재료들을 고려대상에서 제외한다.

(3) 소비자가 재료에 대하여 느끼는 재료지각과 디자이너가 추구하는 제품개성 간의 경계의 폭을 통하여 제품에 적합한 재료의 종류, 예를 들어 금속, 세라믹, 플라스틱, 목재 중에서 한 종류를 선택한다.

(4) 제품디자인의 목표, 예를 들어 가능한 한 고급스럽게 또는 가능한 한 가볍게 등의 목표를 이용하여 선택된 재료들의 순위를 정한다.

(5) 순위에서 상위에 있는 재료들에 대한 다양하고 자세한 정보를 바탕으로 최종 선택을 한다.

3. 스마트폰 후면 재료선택

3.1 디자인 요구사항

기능적인 측면으로 살펴보면, 스마트폰 후면은 외부의 영향으로부터 내부의 전자부품을 보호하고, 사용 시 발생하

는 열을 방출하는 역할을 한다. 또한 색감, 질감 등의 느낌으로 제품의 개성을 부여하는 기능을 한다.

제약조건 측면으로 살펴보면, 인간과의 접촉이 가장 많은 기기 중 하나인 스마트폰은 소비자의 사용에 따라 많은 외부적인 영향에 처해진다. 사용 시 부주의로 바닥에 떨어뜨리는 경우, 심한 충격을 받아 파괴에 이르기기도 하는데, 이를 방지하기 위하여 여러 번의 낙하시험(drop test)을 수행한다. 낙하시험 [10-14]은 제품을 일정 높이에서 딱딱한 표면으로 자유 낙하시키는 시험이다. 1 m 낙하시험은 바지 주머니에 스마트폰을 넣고 뺄 때 실수로 떨어뜨리는 경우를 대비하여 시험을 하며, 위치에너지와 바닥과 충돌 시 접촉되는 면의 면적을 기준하여 평균적으로 계산하면, 후면의 면의 경우, 0.17 kJ/m^2 , 후면의 가장자리의 경우, 4.5 kJ/m^2 의 단위면적당 에너지에 해당된다. 또한 1.5 m 낙하시험은 뒷주머니에 스마트폰을 넣고 뺄 때나 서서 스마트폰을 보다가 떨어뜨릴 경우를 대비하여 시험을 하며, 후면의 면의 경우, 0.25 kJ/m^2 , 후면의 가장자리의 경우, 6.8 kJ/m^2 의 단위면적당 에너지에 해당된다. 그런데 소비자의 실수로 스마트폰을 떨어뜨리는 경우, 대부분 가장자리로

바닥과 충돌하므로 디자인 요구사항에서는 1.5 m 가장자리 낙하를 기준으로 삼는다. 또한 안전계수를 2로 잡으면 13.6 kJ/m^2 의 충격강도(Impact Strength, G_{IC})가 요구된다.

개성적인 측면으로 살펴보면, 스마트폰 후면은 단순히 제품의 형태를 유지하는 역할을 하는 것뿐만 아니라 제품의 독특한 개성을 살리고 있다. 디자이너는 소비자의 취향에 맞는 개성을 재료로부터 느끼는 소비자의 감각을 통하여 적절하게 제품에 부여할 수 있다. 디자이너의 의도와 소비자의 느낌의 간격이 작을수록 제품의 가치는 상승한다.

목표적인 측면으로 살펴보면, 주머니 안에서 다른 물건들과 접촉하거나 딱딱한 물체 위에 놓고 사용할 때 후면의 표면에 흠집이 생길 경우를 대비하여 긁기시험(scratch test) [14-16]을 한다. 긁힘을 방지하기 위해서는 높은 경도의 재료가 요구된다. 또한 스마트폰 사용 시 발생하는 열을 밖으로 빨리 발산해야 하는데, 이를 위해서는 높은 열전도도가 요구된다. 그리고 가벼워야 사용에 편리할 것이다.

이와 같은 디자인 요구사항을 종합하여 표 1에 나타낸다.

Table 1. Design requirements for smartphone rear panel.

Function	<ul style="list-style-type: none"> • protection of components from external influences • heat dissipation
Constraint	<ul style="list-style-type: none"> • impact strength, $G_{IC} > 13.6 \text{ kJ/m}^2$ (use a safety factor of 2)
Personality	<ul style="list-style-type: none"> • using material perception
Objective	<ul style="list-style-type: none"> • high hardness • high thermal conductivity • low density

3.2 제약조건을 이용한 재료선택

스마트폰을 실수로 떨어뜨릴 경우 후면의 파괴방지를 위해 일정한 충격강도 이상의 성질을 가진 재료가 요구된다. 이러한 충격강도를 후면 재료선택의 디자인 요구사항 제약조건으로 정하였으며, 그림 2에 안전계수 2를 고려하여 13.6 kJ/m^2 이상인 재료를 CES Selector [17]의 재료선택차트(material selection chart)로 선별하여 나타내었다.

좌표축은 탄성계수(E)와 파괴인성(K_{IC})을 로그 값으로 표시하였으며, 충격강도를 구하는 식은 다음과 같다.

Fig. 2. Material selection chart for impact strength. Materials above the sloped line have an impact strength value greater than 13.6.

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E}$$

이 식의 양변에 로그 값을 취하고 그림 2의 좌표에 맞게 식을 정리하면, 기울기가 1/2인 사선을 얻는데, 각 사선에 해당되는 충격강도는 탄성계수가 1일 때의 파괴인성 값을 이용하여 구할 수 있다. 각 사선은 일정한 충격강도를 가지며, 그림 2의 사선 위에 있는 모든 재료들은 13.6의 충격강도를 갖는다. 이 사선을 경계로 위쪽에 위치한 재료들은 13.6 이상의 충격강도를 가지며, 제품디자인에서 요구되는 조건, 즉 제약조건을 만족한다. 제약조건을 만족한 재료들은 그림 2에서 다른 재료들과의 구별을 위해서 색을 활성화하여 표시하였으며, 대표적인 재료들을 나열하면, 금속으로는 알루미늄, 구리, 철, 금, 은, 납, 니켈, 타이타늄, 아연 등이 있고, 플라스틱으로는 EMA, EVA, PA, PB, PE, PI, PVC 등이 있고, 천연재료로는 가죽, 목재 등이 있다. 그 외 제약조건을 만족하지 못한 재료들은 재료선택 과정에서 제외된다.

3.3. 재료지각을 이용한 재료선택

제품개성을 표현하는 방법에는 여러 가지가 있는데, 그 중에서 제품에 사용된 재료에 대한 소비자의 재료지각을 이용하는 방법이 매우 효과적이다. 재료지각은 소비자가 느끼는 감정이며, 개개인에 따라서 다르기 때문에 어떤 정해진 규칙, 즉 식에 의해서 계산될 수 없을 것이다. 그러나 개별적으로 의견을 구하는 설문조사 방식으로는 재료지각의 비율, 즉 성향을 구할 수 있다. 설문조사는 응답자가 선택하기에 용이한 방식인 둘 중의 하나를 선택하는 디지털 논리(digital logic)를 이용한다.

표 2에서 보듯이, 각각의 재료에 대한 지각을 양극성 형용사 쌍(bipoar adjective pairs)으로, 예를 들어 금속이 공격적으로 혹은 수동적으로 느껴지는가를 응답자가 선택하도록 한다. 스마트폰 후면 재료선택을 위해 실시된 설문조사의 응답자는 21~25세의 신소재공학을 전공하는 학생들 59명으로 설문에 나와있는 재료의 종류를 충분히 구별할

수 있었다. 응답자들은 이 연구의 목적과 재료지각의 의미에 대해 설명을 들었으며, 응답 시 각자의 느낌을 표현하기 위해서 서로 의논하는 것을 금지하였다. 모든 응답자의 선택을 기준으로 각각의 재료지각에 대한 상대빈도(relative frequency)를 이용하여 극단적인 값뿐만 아니라 상보적인 값, 즉 중간 성격의 값을 구할 수 있다. 표 2에서 보면, 금속은 응답자의 80%가 공격적이라고 생각한다는 것이다. 70% 이상의 응답자가 선택한 지각은 그 재료의 고유한 특성이라고 볼 수 있으며 [8], 표 2에 굵은 글씨로 표시되었다. 이를테면 금속은 공격적이고, 단단하고, 차갑고, 진지하고, 성숙하며, 플라스틱은 수동적이고, 유행에 따르고, 연하고, 익살맞고, 젊으며, 목재는 수동적이고, 따뜻하다고 소비자가 강하게 느끼고 있다는 것이다. 표 2에 제시된 6개의 형용사 쌍은 연구대상인 금속, 플라스틱, 목재의 재료지각을 조사하는데 있어서의 신뢰도와 연관성을 비율검정(proportion test)과 상관분석(correlation analysis)으로 검증한 쌍들이다 [9].

소비자가 느끼는 재료지각과는 달리, 디자이너가 제품에 부여하고 싶은 제품개성에서는 정확한 의미 부여가 가능하므로 의미분화(Semantic Differentiation)를 [18] 사용한다. 10:0 에서 0:10 까지의 11점 척도를 이용하여 연속적인 값으로 제품개성을 나타낼 수 있다. 척도를 언어적으로 표현하면, 5는 중립적으로(neutrally), 6은 약간(slightly), 7은 꽤(fairly), 8은 아주(quite), 9는 매우(very), 10은 대단히(extremely)로 나타낼 수 있다. 예로써, 한 디자이너가 여러 가능한 경우 중 다음과 같은 개성을 부여하고 싶다고 하자; 공격적인-수동적인 (7-3), 고전의-유행의 (2-8), 단단한-연한 (7-3), 따뜻한-차가운 (2-8), 익살맞은-진지한 (6-4), 성숙한-젊은 (3-7). 표 3에 위의 디자이너가 부여하고 싶은 제품개성과 소비자가 느끼는 재료지각과의 일치의 정도를 보여주고 있다.

그 일치의 정도는 δ 로 표시하며, 소비자가 느끼는 재료지각과 디자이너가 부여하고픈 제품개성과의 유클리드 거리(Euclidean distance)로 계산할 수 있다 [8,9]. 계산 결

Table 2. Index of material perceptions by users.

		Metal		Plastic		Wood	
Aggressive	Passive	0.80	0.20	0.24	0.76	0.25	0.75
Classic	Trendy	0.42	0.58	0.29	0.71	0.63	0.37
Hard	Soft	0.93	0.07	0.15	0.85	0.56	0.44
Warm	Cold	0.14	0.86	0.51	0.49	0.88	0.12
Humorous	Serious	0.14	0.86	0.85	0.15	0.54	0.46
Mature	Youthful	0.73	0.27	0.19	0.81	0.66	0.34

Table 3. δ values for smartphone rear panel.

	Metal	Plastic	Wood
Aggressive - Passive	0.10	0.46	0.45
Classic - Trendy	0.22	0.09	0.43
Hard - Soft	0.23	0.55	0.14
Warm - Cold	0.06	0.31	0.68
Humorous - Serious	0.46	0.25	0.06
Mature - Youthful	0.43	0.11	0.36
δ	0.25	0.29	0.35

Fig. 3. Material selection chart for density and hardness.

과, 금속의 경우가 가장 작은 값을 가지고 있으므로 디자이너의 의도에 가장 적합한 재료는 금속임을 알 수 있다. 금속으로 재료가 선택된다면, 표 3의 수치에서 확인되듯이, 디자이너가 의도했던 제품개성 중에 꽤 공격적이며, 아주 차가운 개성은 잘 반영된 것이며, 아주 유행적이며, 꽤 단단한 제품개성은 비교적 잘 반영된 것이다.

3.4. 목표를 이용한 재료선택

제약조건과 재료지각을 이용한 디자이너의 제품개성 부여에 적합한 재료선택 결과 일부의 금속이 선택되었다.

그림 3은 재료선택의 목표인 굽힘방지를 위한 높은 경도와 사용의 편리함을 위한 낮은 밀도 성질을 이용하여 재료

선택차트로 선택한 결과이다. 차트의 왼쪽, 윗부분으로 갈수록 목표에 적합한 재료로 볼 수 있다. 그러나 경도와 밀도, 두 조건을 동시에 만족하는 위치의 재료는 뚜렷하게 찾아볼 수는 없다. 철 합금의 경우 경도는 높으나 무겁고, 알루미늄 합금의 경우, 가벼우나 경도가 조금 낮고, 타이타늄 합금의 경우, 중간 정도의 값을 갖고 있어, 어느 재료가 목표에 확실하게 적합하다고 볼 수는 없으나, 모두 1차적인 후보가 될 수는 있다고 판단된다.

1차적인 후보들을 대상으로 재료선택의 다른 목표인 열전도도를 이용하여 재료선택차트를 구하면 그림 4와 같다. 열전도도가 높고, 밀도가 낮은 재료는 차트의 왼쪽 윗부분에 위치한다. 그림 3에서의 1차후보였던 철과 타이타늄 합

Fig. 4. Material selection chart for density and thermal conductivity.

Table 4. Supporting information for top-ranked materials.

	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Maximum Service Temperature [°C]
Al 2024	248 ~ 372	359 ~ 510	110 ~ 170
Al 3013	133 ~ 147	147 ~ 163	130 ~ 200
Al 5005	138 ~ 152	152 ~ 168	130 ~ 200
Al 6061	103 ~ 124	172 ~ 241	110 ~ 170
Al 7075	100 ~ 110	214 ~ 236	110 ~ 170

금은 아래로 많이 치우쳤고, 알루미늄 합금은 왼쪽 윗부분에 위치한다. 따라서 재료선택의 모든 목표에 적합한 재료는 알루미늄 합금으로 판단된다. 선택된 알루미늄 합금 중에 순위를 정하면, 아래 표 4의 5개 합금이 상위순위로 정해진다.

3.5. 보조정보에 따른 재료선택

디자인 목표에 의한 순위 매김을 한 결과, 5개의 재료가 선택되었는데, Al 2024, Al 3013, Al 5005, Al 6061, Al 7075 이다. 이번 단계에서는 이 5개의 재료에 대한 다른 성질들을 비교하여 최종 1개의 재료를 선택하는 과정이다.

표 4의 자료는 CES Selector [17]의 자료를 참조하였다. 스마트폰 후면은 사용 시 충격으로 인한 변형을 방지해야 하는데, 그를 위해서는 높은 항복응력이 요구되며, 후면 모서리의 제조공정에서 불균질 변형을 방지하기 위해서는 높은 인장응력 그리고 항복응력과 인장응력의 큰 차이가 요구되므로, 표 4에서 Al 2024가 가장 적합한 것으로 나온다. 최대사용온도 면에서는 Al 3013과 Al 5005가 가장 높아서 스마트폰 사용 시 발열에 가장 안정적이나 Al 2024의 최대사용온도인 110~170도도 충분할 것으로 판단된다. 또한 스마트폰 후면 재료로서 요구되는 다른 성질인, 순수한 물, 바닷물, 자외선에 대한 내구성, 제조공정에 필요한 에너지(197~218 MJ/kg)와 발생하는 CO₂(11.4~12.6 kg/kg)는 표 4의 모든 재료에 있어 같은 값을 보인다 [17]. 종합적으로 보면, Al 2024가 스마트폰 후면의 재료로서 가장 적합할 것으로 판단된다.

4. 결 론

스마트폰 후면은 외부의 영향으로부터 내장된 전자부품을 보호하며, 사용 시 발생하는 열을 외부로 발산시키는 역할을 할 뿐만 아니라 특정한 감성을 스마트폰이 지니도록 하는 역할을 한다. 이러한 제품의 특성에 필요한 디자인 요구사항은 제약조건으로써 충격강도, 제품개성으로써

재료지각, 제품목표로써 경도, 열전도도, 밀도, 보조정보로써 항복강도, 인장강도, 최대사용온도, 물과 바닷물, 자외선에 대한 내구성, 제조공정의 에너지 사용량과 이산화탄소 발생량 등이 있다. 본 사례연구에서는 제약조건으로, 스마트폰 낙하 시 후면 파괴방지를 위해 일정한 충격강도 이상에 해당되는 재료를 구하여 금속, 플라스틱, 천연재료에 속한 재료들이 선택되었으며, 재료지각을 통하여 디자이너가 추구하는 의도에 맞는 재료종류로서 금속이 선택되었으며, 제품목표를 이용하여 5가지 알루미늄 합금이 선택되었으며, 보조정보를 참고하여 스마트폰 후면에 가장 적합한 재료로서는 최종적으로 Al 2024가 선택되었다.

엔지니어링과 재료지각 기반 재료선택방법을 방대한 데이터베이스의 소프트웨어와 설문조사를 이용하여 스마트폰 후면의 재료선택에 적용함으로써 소비자가 원하고, 디자이너가 추구하는 제품에 대한 최적의 재료를 선택할 수 있다고 판단된다.

REFERENCES

1. M. Ashby and K. Johnson, *Materials and design: the art and science of material selection in product design*, 1st ed. 6, Butterworth-Heinemann, Oxford (2002).
2. M. Ashby and K. Johnson, *Materials Today*. **6**, 24 (2003).
3. I. Van Kesteren, P. J. Stappers, and P. Kandachar, *Nordic Design Research Conference*, 1 Copenhagen (2005).
4. E. Karana and I. Van Kesteren, *Design and Emotion Moves* (eds. P. Desmet, J. Van Erp, and M. A. Karlsson), 221, Cambridge Scholars Publishing, UK (2008).
5. L. Veelaert, E. Du Bois, I. Moons, and Elvin Karana, *Materials and Design*. **190**, 108543 (2020).
6. M. Ashby, Y. Brechet, D. Cebon, and L. Salvo, *Materials and Design*. **25**, 51 (2004).
7. M. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3rd ed. 79, Elsevier, Oxford (2005).
8. J. Choi, *Int. J. Interact. Des. Manuf.* **11**, 967 (2017).
9. J. Choi, *Met. Mater. Int.* **27**, 1599 (2021).

10. IEC 60068-2-31, Environmental Testing – Part 2-31: Tests – Test Ec: Rough handling shocks, primarily for equipment-type specimens (2008).
11. MIL-STD-810H, Department of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests (31-Jan-2019).
12. TCO Certified, TCO certified generation 8 for smartphones (2019).
13. C. Clemm, A. Berwald, C. Prewitz, N. F. Nissen, and M. Schneider-Ramelow, *Proceedings of Electronics Goes Green 2020+* (ed. M. Schneider-Ramelow), 171, Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration IZM, Berlin, Germany (2020).
14. M. Cordella, F. Alfieri, C. Clemm, and A. Berwald, *J. Cleaner Production*, **286**, 125388 (2021).
15. ISO 1518-1, Paints and Varnishes – Determination of Scratch Resistance – Part 1: Constant-Loading Method (2019).
16. ISO 1518-2, Paints and Varnishes – Determination of Scratch Resistance – Part 1: Variable-Loading Method (2019).
17. Ansys Granta, <https://www.ansys.com/products/materials> (2021).
18. C. E. Osgood, G. J. Suci, and P. H. Tannenbaum, *The measurement of meaning*, 1, University of Illinois Press, Urbana (1957).